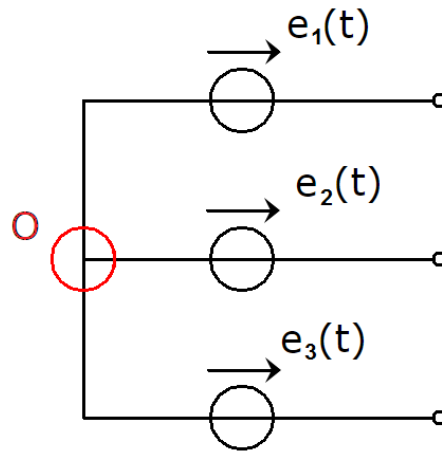


IL SISTEMA TRIFASE

È composto da tre generatori in regime permanente sinusoidale sfasati l'uno con l'altro:



I tre morsetti hanno origine da un unico punto che prende il nome di **centro stella dei generatori** (indicato con "O" nel disegno). Riscriviamo le tre tensioni variabili nel tempo attraverso i rispettivi fasori con il modulo normalizzato al valore efficace:

$$\overline{E}_1 = E_1 e^{j\alpha_1}$$

$$\overline{E}_2 = E_2 e^{j\alpha_2}$$

$$\overline{E}_3 = E_3 e^{j\alpha_3}$$

Con α_1 , α_2 e α_3 che rappresentano le fasi iniziali di ciascun generatore. Se dovessimo ricavare la funzione sinusoidale di ogni generatore avremo:

$$e_k(t) = \sqrt{2} E_k \sin(\omega t + \alpha_k) \quad \text{con } k = 1, 2, 3$$

N.B.: la pulsazione ω è la stessa per tutti e tre i fasori altrimenti avremmo dovuto ricorrere ai **vettori rotanti**.

IL SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO

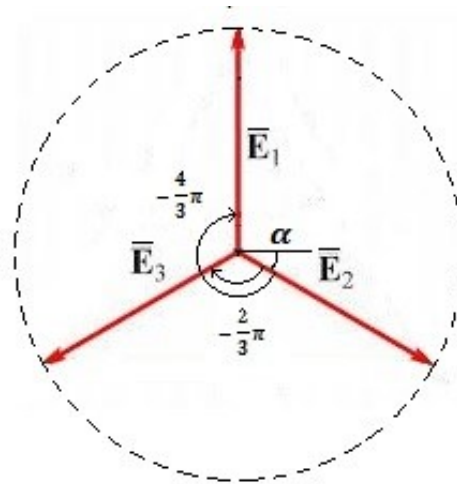
Essendo tre fasori, possiamo rappresentare la terna su un piano di Gauss. In particolare c'è una speciale disposizione che ci permette di ricavare importanti proprietà dei sistemi trifase; tale configurazione si ha quando tutti e tre i fasori hanno il modulo uguale e sono sfasati di 120° :

$$E_k = E_h \quad \forall k \neq h$$

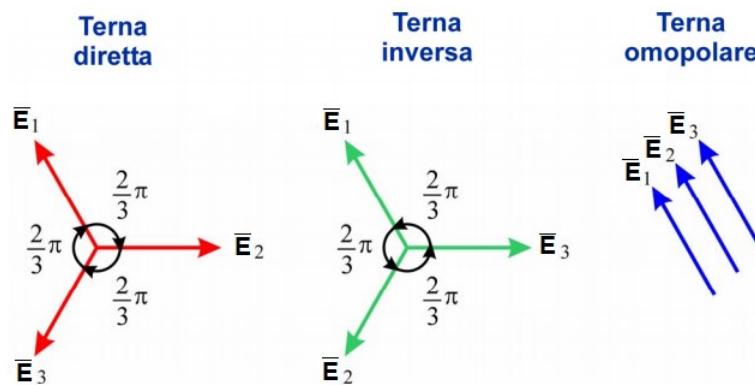
Con: $\alpha_1 = \alpha$

$$\alpha_2 = \alpha - \frac{2}{3}\pi$$

$$\alpha_3 = \alpha - \frac{4}{3}\pi$$

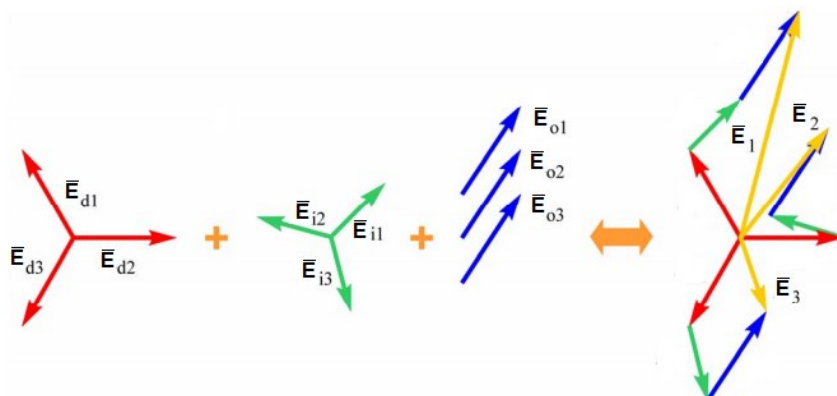


Questa configurazione si ha quando il sistema trifase è detto **simmetrico** e la **sequenza** di fasori è detta **diretta** se i segni degli sfasamenti sono negativi (ritardi), o **inversa** se sono positivi (anticipi). Qualora i tre fasori siano allineati, ossia con angoli di sfasamento nulli, la sequenza prende il nome di **sequenza omopolare**.



IL TEOREMA DI FORTESQUE

L'aver messo i fasori sul piano di Gauss ci permette di applicare il **teorema di Fortesque** (o *algebra delle sequenze*) che afferma che ogni terna di fasori può essere espressa come somma di una terna diretta, una inversa e una omopolare. Quindi il teorema permette di trasformare in tre terne fondamentali una terna di fasori non simmetrica:



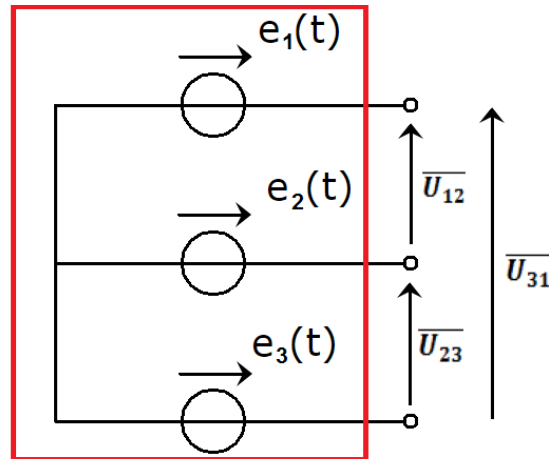
Per ora ci occuperemo solo di sistemi trifase simmetrici il cui modulo della tensione, costante per tutti e tre i fasori, vale E . La terna di fasori, configurata in sequenza diretta sarà:

$$\overline{E}_1 = E e^{j\alpha}$$

$$\overline{E}_2 = E e^{j(\alpha - \frac{2}{3}\pi)}$$

$$\overline{E}_3 = E e^{j(\alpha - \frac{4}{3}\pi)}$$

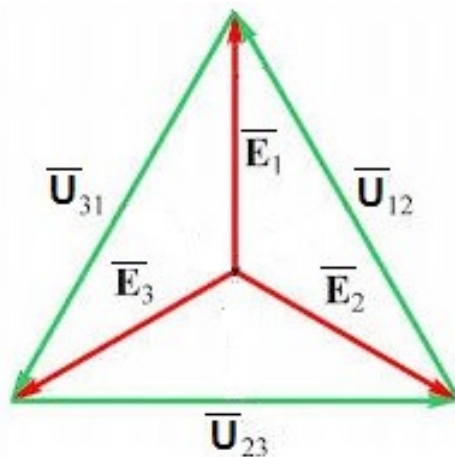
Andiamo a misurare le tensioni tra un morsetto e l'altro, che prendono il nome di **tensioni concatenate**:



$$\overline{U}_{12} = \overline{E}_1 - \overline{E}_2$$

$$\overline{U}_{23} = \overline{E}_2 - \overline{E}_3$$

$$\overline{U}_{31} = \overline{E}_3 - \overline{E}_1$$



Ci si riferisce alla figura sopra: siamo interessati a trovare la relazione che c'è tra il modulo della tensione concatenata \overline{U} e il modulo della tensione dei fasori \overline{E} . Applichiamo il teorema di Carnot al triangolo formato da due fasori di tensioni generate e il fasore di tensione concatenata, essendo note le lunghezze degli altri due lati e l'ampiezza dell'angolo tra essi compreso. Si ha dunque:

$$|\overline{U}_{12}|^2 = |\overline{E}_1|^2 + |\overline{E}_2|^2 - 2 \cdot |\overline{E}_1| \cdot |\overline{E}_2| \cos \frac{2}{3}\pi$$

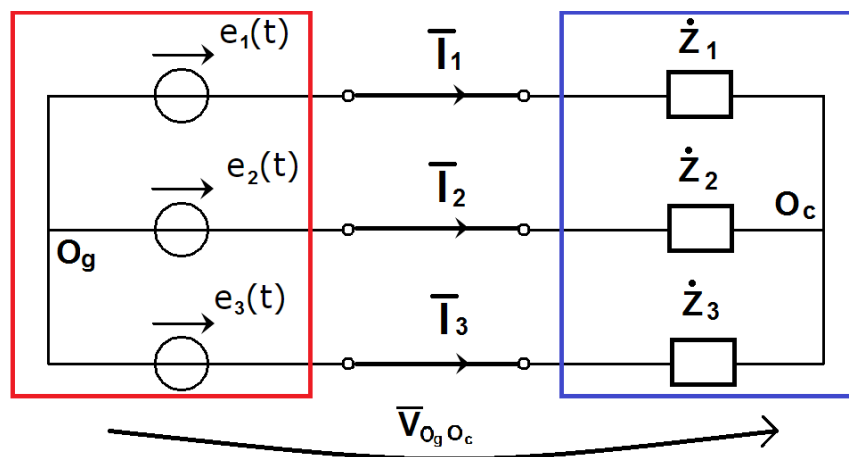
Da cui otteniamo la relazione:

$$U = \sqrt{3}E$$

Quindi se quando avevamo il sistema monofase la tensione nominale era di 230 V, ora se il sistema è trifase, esso è alimentato a circa 400 V.

IL SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO SQUILIBRATO

Collegiamo ai tre generatori di prima una rete passiva in configurazione a stella; tale rete rappresenta la rete dei carichi, e il punto dove convergono le tre impedenze è detto **centro stella dei carichi** (O_c):



Calcoliamo la differenza di potenziale tra i due centri stella, scegliendo come nodo di saldo il centro stella dei generatori, in modo tale che il vettore $\bar{V}_{O_g O_c}$ rappresenti effettivamente la differenza di tensione tra i due centri :

$$\bar{V}_{O_g O_c} = \frac{\dot{Y}_1 \bar{E}_1 + \dot{Y}_2 \bar{E}_2 + \dot{Y}_3 \bar{E}_3}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3} = \frac{\sum_{k=1}^3 \dot{Y}_k \bar{E}_k}{\sum_{k=1}^3 \dot{Y}_k}$$

N.B.: al numeratore sono presenti le correnti nodali.

Nota la differenza di potenziale ai centri, utilizziamo il principio alle tensioni di Kirchhoff, applicato a percorsi formati da ciascun lato e chiusi da $\bar{V}_{O_g O_c}$:

$$\dot{Z}_k \bar{I}_k - \bar{E}_k + \bar{V}_{O_g O_c} = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_k = \frac{\bar{E}_k - \bar{V}_{O_g O_c}}{\dot{Z}_k}$$

La potenza trasmessa da un tripolo all'altro, espressa tramite la sua forma complessa, sarà la somma delle potenze erogate dai generatori o assorbite da ciascuna impedenza:

POTENZE EROGATE

$$\bar{A} = \sum_{k=1}^3 \bar{E}_k \bar{I}_k^* = P_k + jQ_k$$

POTENZE ASSORBITE

$$\bar{A} = \sum_{k=1}^3 \dot{Z}_k |\bar{I}_k|^2 = P_k + jQ_k$$

Il sistema che otteniamo è **simmetrico nelle tensioni**, ma **squilibrato nelle correnti** perché dipende dai valori delle impedenze Z .

IL SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO EQUILIBRATO

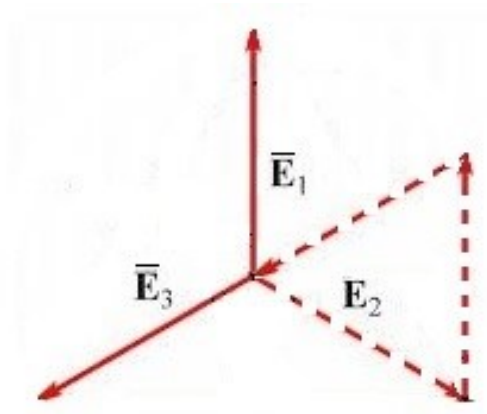
Se prendiamo tre impedenze uguali avremo che:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_3 = \dot{Z}$$

Il sistema diventa **simmetrico per le tensioni** e **equilibrato per le correnti**. La differenza di potenziale tra i centri stella sarà:

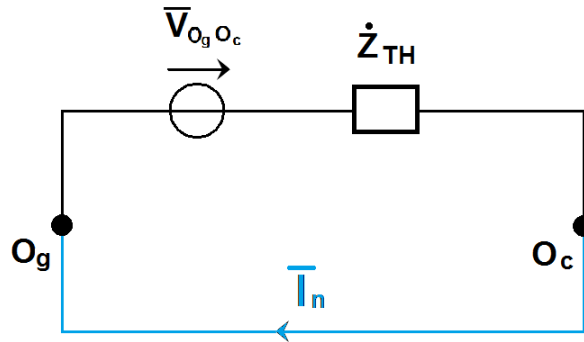
$$\bar{V}_{O_g O_c} = \frac{\dot{Y}_1 \bar{E}_1 + \dot{Y}_2 \bar{E}_2 + \dot{Y}_3 \bar{E}_3}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3} = \frac{\dot{Y} \sum_{k=1}^3 \bar{E}_k}{3\dot{Y}} = \frac{\sum_{k=1}^3 \bar{E}_k}{3}$$

Al numeratore abbiamo la sommatoria dei tre fasori simmetrici che, formando un triangolo equilatero, è pari a zero:



$$\sum_{k=1}^3 \bar{E}_k = \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_{O_g O_c} = \mathbf{0}$$

Si ha l'**unicità del centro stella**, ossia, nonostante i due centri siano fisicamente separati, se il carico è equilibrato il sistema simmetrico fa sì che i due centri si trovino in un *cortocircuito virtuale*, cioè come se fossero collegati con impedenza nulla. In questo caso non abbiamo bisogno di distribuire il neutro per avere ai capi di ciascuna impedenza la tensione stellata (corrispondente a 230 V per il sistema monofase) perché la corrente che dovrebbe trasportare il filo neutro sarebbe zero. Per dimostrarlo applichiamo il teorema di Thevenin alla rete tra i centri stella, trovando la seguente rappresentazione esterna:



$$\dot{Z}_{TH} = \frac{1}{\dot{Y}_1 + \dot{Y}_2 + \dot{Y}_3}$$

$$\bar{I}_n = \frac{\bar{V}_{O_g O_c}}{\dot{Z}_{TH}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{filo neutro inutile}$$

Se il carico è squilibrato, invece, allora c'è differenza di potenziale tra i due centri stella e quindi scorrerà della corrente anche nel neutro che in questo caso dovrà essere distribuito.

IL NEUTRO

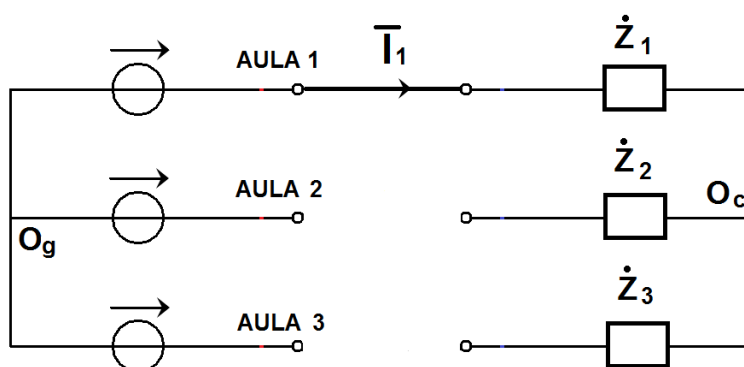
il filo neutro nei sistemi elettrici è contraddistinto dal colore blu e rappresenta il conduttore che serve da ritorno per la corrente che arriva al carico tramite il conduttore di fase, nei sistemi monofase; mentre serve da ritorno per la corrente di squilibrio nel sistema trifase (se il sistema è equilibrato non serve a niente). Il collegamento di neutro rappresenta un cortocircuito che tende a uguagliare il potenziale del neutro del carico a quello del trasformatore, ripristinando così parzialmente la simmetria delle tensioni di linea. Il conduttore di neutro è da considerarsi a tutti gli effetti *conduttore attivo*, come quello di fase, anche se nella maggioranza dei casi avrà una tensione rispetto a terra di pochi volt, il perché lo si capirà nell'argomento che segue.

APPLICAZIONI DEL SISTEMA TRIFASE

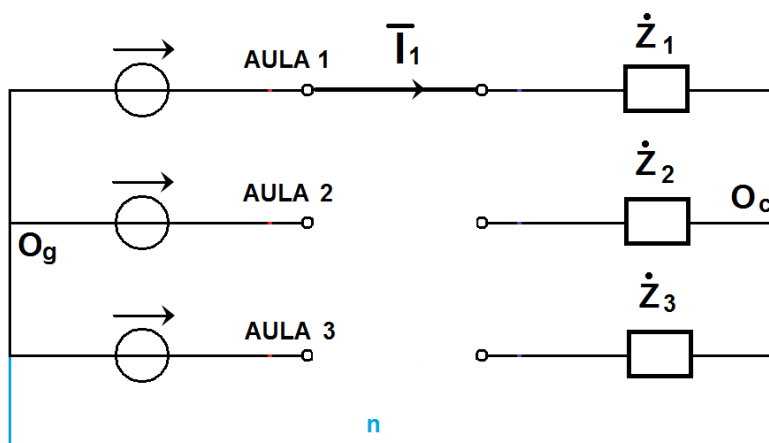
I sistemi trifase utilizzati nella **trasmissione**, cioè per l'*alta tensione*, sono composti sempre da tre fili fase senza il neutro; i sistemi trifase applicati alla **distribuzione**, invece, salvo il caso in cui il sistema è equilibrato, sono composti da tre fili fase più il filo neutro e le tensioni che si hanno sono *basse*. La domanda allora è: perché il neutro è distribuito solo in bassa tensione?

Quando stiamo in alta tensione, le centrali elettriche alimentano le linee di distribuzione che smistano la potenza elettrica ai vari punti di raccolta dai quali viene nuovamente smistata alle utenze. Nella prima distribuzione (all'ingrosso) abbiamo un carico che statisticamente è molto facile da distribuire in modo equilibrato alle tre fasi, ossia più il carico da servire è grande più è facile per il progettista far diventare unico il centro stella e rendere trascurabili gli eventuali squilibri.

Nella situazione di bassa tensione, invece, i carichi non solo richiedono diverse potenze ma il loro uso è strettamente legato alle abitudini dell'utenza: se per esempio abbiamo tre aule alimentate da un sistema monofase senza neutro, per far sì che non sorgano problemi dovremmo avere una situazione particolare per cui le impedenze presenti nelle tre aule siano le stesse (es: lo stesso computer collegato, la stessa lampadina accesa...). Ciò naturalmente oltre a essere pressoché impossibile, è anche controproducente, perché se apriamo l'interruttore nell'aula 2 e nell'aula 3, l'aula 1 è addirittura disalimentata in quanto, non essendoci un neutro che ne garantisce il ritorno, la corrente è nulla; inoltre quello che succede dal punto di vista dei fasori è che nel triangolo delle tensioni di fase il centro stella reale e quello virtuale non coincidono più, anzi si differenziano di decine di volt, dando luogo alle correnti squilibrate.



L'inserimento del filo neutro permette di risolvere il problema perché anche se l'aula 2 e l'aula 3 sono in disservizio nell'aula 1 la corrente circola regolarmente:

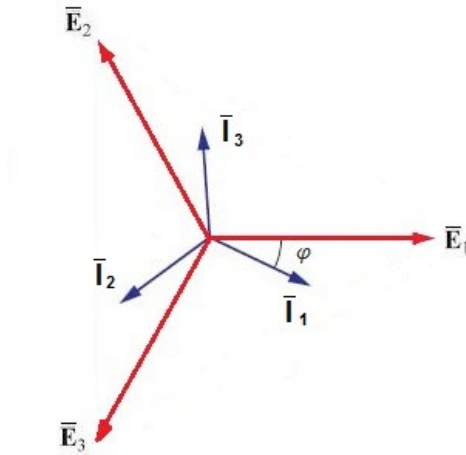


DIMENSIONAMENTO DEI CONDUTTORI

A ogni corrente calcolata, segue il dimensionamento della sezione dei conduttori di linea, cioè dei fili che la trasporteranno. Ogni conduttore è caratterizzato dalla propria **portata**, ossia può sopportare un'intensità di corrente massima, oltre la quale non sussistono le garanzie di sicurezza che rendono l'impianto idoneo al suo utilizzo. Più è grande la corrente, più ampia sarà la sezione del conduttore e più rame dovremo impiegare per la sua realizzazione (e il che fa lievitare i costi per l'impianto).

IL MODELLO MONOFASE EQUIVALENTE

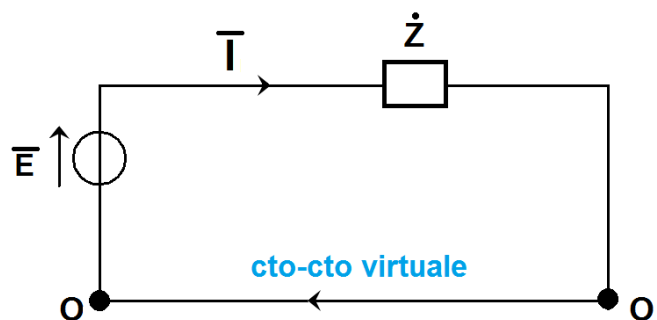
Se riprendiamo il caso di sistema trifase con carico equilibrato e rappresentiamo i fasori corrente e tensione nel triangolo delle tensioni, le correnti saranno sfasate con le loro rispettive tensioni di un angolo φ , comune a tutte e tre le correnti, che dipende unicamente dall'argomento delle loro ammettenze:



Quindi possiamo concludere che se il sistema è simmetrico ed equilibrato per capire come funziona il sistema trifase basta studiare un monofase perché da quest'ultimo possiamo risalire al comportamento delle altre fasi dato che anche le correnti tra loro formano un sistema simmetrico sfasato di 120° . Il sistema monofase che si va a studiare prende il nome di **modello monofase equivalente** per un sistema trifase simmetrico ed equilibrato.

Si può quindi fare riferimento ad un circuito monofase equivalente (per esempio alla prima fase) e, una volta risolto in circuito monofase equivalente, è possibile determinare le tensioni e le correnti delle altre due fasi introducendo gli opportuni sfasamenti di $\pm 2\pi/3$ (a seconda che la terna alimentante sia inversa o diretta).

Se abbiamo, ad esempio, un sistema trifase simmetrico equilibrato a 400 V, automaticamente sappiamo che questi 400 V coincidono con la tensione concatenata, li dividiamo per $\sqrt{3}$ per ottenere la tensione stellata e rappresentiamo il sistema trifase tramite il modello monofase equivalente:



Dove la tensione \bar{E} del generatore è pari alla tensione stellata sfasata di 0° per la prima fase, -120° per la seconda, -240° per la terza.

Il cortocircuito con il quale chiudo la rete non è reale, cioè non è dovuto a un conduttore fisico, ma è virtuale, e serve a farci capire solo che tra i centri O e O' non c'è tensione perché tutte le impedenze sono uguali (unicità del centro stella). Nei casi squilibrati, invece, per ogni fase sarà necessario descrivere tre

schemi circuitali che non si chiudono con un cortocircuito virtuale ma con un neutro sul quale c'è una tensione reale che dipende dalle impedenze collegate a ciascuna fase.

POTENZA NEI SISTEMI TRIFASE SIMMETRICI

Per quanto riguarda la potenza:

$$\bar{A} = 3\bar{E}\bar{I}^* = 3EI \cos \varphi + j 3EI \sin \varphi$$

Dove:

$$P = 3EI \cos \varphi = \text{potenza attiva}$$

$$Q = 3EI \sin \varphi = \text{potenza reattiva}$$

$$A = \sqrt{(3EI \cos \varphi)^2 + (3EI \sin \varphi)^2} = \sqrt{9E^2I^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi)} = 3EI$$

Potenza attiva, reattiva e apparente possono essere espresse anche attraverso le tensioni concatenate ricordando che:

$$E = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

$$P = 3EI \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

$$Q = 3EI \sin \varphi = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

$$A = 3EI = \sqrt{3} UI$$

SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO SQUILIBRATO

Riprendiamo la definizione di potenza istantanea e applichiamo ad ogni k-esimo generatore per il caso di sistema trifase simmetrico squilibrato:

$$p_k(t) = v_k(t) i_k(t) = EI_k \cos \varphi_k - EI_k \cos(2\omega t + \alpha_k + \beta_k)$$

Dove:

$$\alpha_k = \text{fase della tensione}$$

$$\beta_k = \text{fase della corrente}$$

La potenza totale istantanea dei tre generatori sarà:

$$p(t) = \sum_{k=1}^3 p_k(t)$$

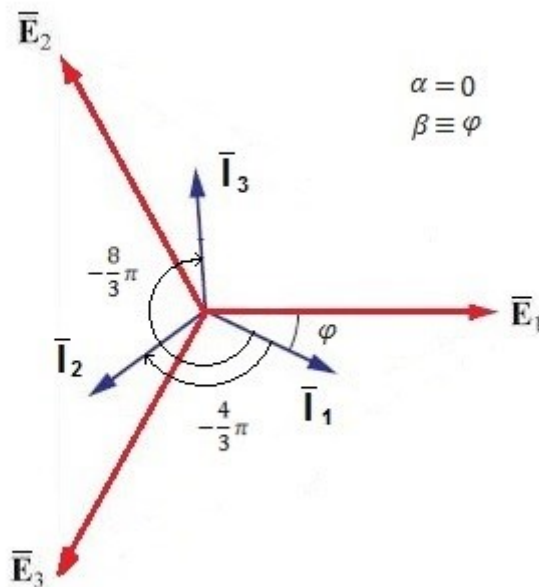
SISTEMA TRIFASE SIMMETRICO EQUILIBRATO

Se il trifase è simmetrico ed equilibrato:

$$I_k \Rightarrow I \quad (\text{perchè in modulo le correnti sono uguali})$$

$$\varphi_k \Rightarrow \varphi \quad (\text{perchè lo sfasamento tra i fasori corrente e tensione è lo stesso})$$

$$\begin{aligned} \alpha_k + \beta_k &\Rightarrow \text{per } k = 1 \rightarrow \alpha + \beta \\ &\Rightarrow \text{per } k = 2 \rightarrow \alpha - \frac{2}{3}\pi + \beta - \frac{2}{3}\pi = \alpha + \beta - \frac{4}{3}\pi \\ &\Rightarrow \text{per } k = 3 \rightarrow \alpha - \frac{4}{3}\pi + \beta - \frac{4}{3}\pi = \alpha + \beta - \frac{8}{3}\pi \end{aligned}$$



Se i tre fasori hanno modulo uguale e sfasamento tale da restituire un sistema simmetrico allora potremo scrivere:

$$p(t) = \sum_{k=1}^3 p_k(t) = 3EI \cos \varphi = P$$

Da cui possiamo affermare che in un sistema trifase simmetrico ed equilibrato la potenza istantanea è *costante* e coincide con la potenza attiva; il che vuol dire che se riusciamo a realizzare suddetto sistema la potenza fluttuante sarà *assente*: questo risultato, dal punto di vista energetico non fa cambiare nulla perché già avevamo visto che il valore medio della potenza fluttuante è nullo, mentre, dal punto di vista meccanico non si ha presenza di vibrazioni e ciò si ripercuote anche nella sfera uditiva, per cui diremo che un motore elettrico alimentato da un sistema trifase simmetrico equilibrato è *silenzioso*.

MONOFASE O TRIFASE?

Immaginiamo di dover trasmettere una potenza a un carico e di dover scegliere tra sistema monofase o trifase...

Tra le varie voci di costo da considerare vi è il **grado di isolamento** che dobbiamo garantire.

N.B.: Le classi, o gradi, di isolamento elettrico sono il raggruppamento omogeneo definito dall'IEC (International Electrotechnical Commission) delle caratteristiche tecniche applicabili ad un dispositivo elettrico per limitare i rischi di folgorazione conseguenti ad un guasto dello stesso.

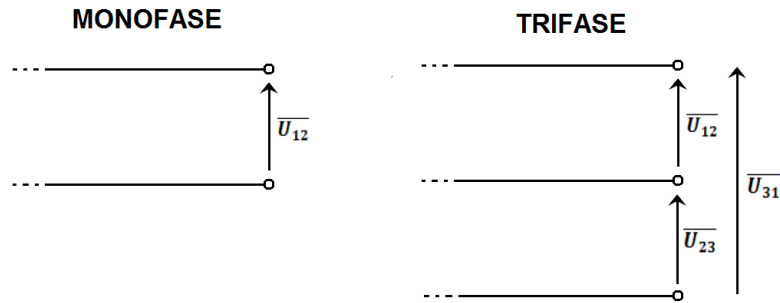
Per vedere come si comportano i due sistemi ragioneremo con valori di tensioni concatenate nominali uguali per entrambi i sistemi:

$$U_m = U_T = U$$

Analogamente la potenza che vogliamo trasmettere al carico, P_c , sarà uguale per entrambi i sistemi:

$$P_m = P_T = P_c$$

Tuttavia, pur essendo le stesse, le tensioni nominali che si hanno tra i morsetti del trifase sono tre, mentre sul monofase è una:



Inoltre bisogna tenere conto delle **perdite joule** dovute alla presenza delle resistenze sui conduttori, che, come si nota in figura, sono 3 per il trifase e 2 per il monofase.

Calcoliamo la potenza che arriva al carico C in monofase e in trifase:

$$P_c = UI_m$$

$$P_c = 3EI_T = 3 \frac{U}{\sqrt{3}} I_T = \sqrt{3}UI_T$$

Per il trifase si è posto $\cos \varphi = 1$ e $E = \frac{U}{\sqrt{3}}$.

Uguagliando le due potenze è possibile ricavare la relazione tra correnti in monofase e correnti in trifase:

$$UI_m = \sqrt{3}UI_T \quad \Rightarrow \quad I_m = \sqrt{3} I_T$$

Ciò vuol dire che nella linea trifase scorre una corrente *più piccola* rispetto a quella monofase.

Se imponiamo le stesse perdite joule per entrambi i sistemi avremo che:

$$P_J = 2 R_m I_m^2 \quad \text{MONOFASE}$$

$$P_J = 3 R_T I_T^2 \quad \text{TRIFASE}$$

Dove 2 e 3 sono il numero di conduttori rispettivamente del monofase e del trifase. Uguagliando le due perdite e sostituendo alla corrente monofase la corrispettiva trifase otteniamo:

$$2 R_m (\sqrt{3} I_T)^2 = 3 R_T I_T^2 \quad \Rightarrow \quad 2 R_m 3 I_T^2 = 3 R_T I_T^2 \quad \Rightarrow \quad 2 R_m = R_T$$

Ciò vuol dire che per avere perdite joule uguali dovremo costruire dei conduttori tali che la resistenza di quelli in monofase sia il doppio di quelli in trifase. Sapendo che:

$$R_m = \rho \frac{l}{S_m} \quad R_T = \rho \frac{l}{S_T}$$

Dove ρ è la resistività del filo e l è la distanza dai generatori alla trasmissione, entrambi uguali sia per il sistema monofase che per il trifase; S è la sezione trasversale del filo. Sostituendo otteniamo:

$$2 R_m = R_T \quad \Rightarrow \quad 2 \rho \frac{l}{S_m} = \rho \frac{l}{S_T} \quad \Rightarrow \quad 2 \frac{1}{S_m} = \frac{1}{S_T} \quad \Rightarrow \quad S_T = \frac{S_m}{2}$$

Il volume di rame da utilizzare per realizzare il collegamento:

$$V_T = 3 S_T l$$

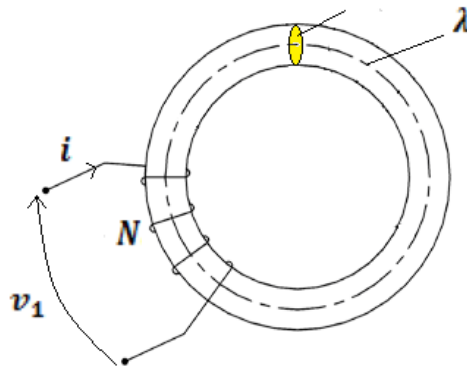
$$V_m = 2 S_m l$$

$$\frac{V_T}{V_m} = \frac{3 S_T}{2 S_m} = \frac{3 \cdot 1}{2 \cdot 2} = \frac{3}{4}$$

Quindi a parità di perdite joule, di potenza, di lunghezza e di materiale realizzare un sistema trifase necessita del 25% in meno di volume di rame rispetto a un sistema monofase.

IL TRASFORMATORE

Il **trasformatore** è anche detto **macchina elettrica statica** in quanto non ha parti meccaniche moventi. Per capire il funzionamento di questo nuovo dispositivo occorre andare a riprendere dei concetti sull'induttore e sull'induttanza:



A partire dalla seguente relazione:

$$H\lambda = Ni$$

Si arrivava all'espressione:

$$Ni = \frac{\lambda}{S\mu} \Phi$$

La quantità $\frac{\lambda}{S\mu}$ prende il nome di **riluttanza** \mathcal{R} , le cui unità di misura possono essere facilmente ricavabili sfruttando l'equazione sopra:

$$[Ni] = A$$

$$[\Phi] = V s$$

$$[\mathcal{R}] = \frac{A}{V s} = \frac{1}{\Omega s}$$

Il flusso in funzione della riluttanza sarà:

$$\Phi = Ni / \mathcal{R}$$

Se lo inseriamo nella formula dell'induttanza:

$$L = \frac{N\Phi}{i} = N^2 / \mathcal{R}$$

E quindi le unità di misura della riluttanza possono anche essere espresse tramite l'inverso dell'induttanza:

$$[\mathcal{R}] = H^{-1}$$

L'aver definito la riluttanza ci permette di introdurre la **legge di Hopkinson**, duale della legge di Ohm:

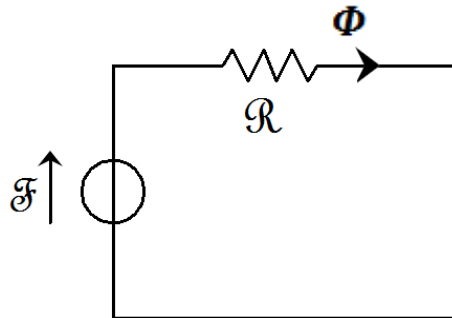
$$v = R i \quad \text{legge di Ohm}$$

$$Ni = \mathcal{R} \Phi \quad \text{legge di Hopkins}$$

Il prodotto Ni prende il nome di **forza magnetomotrice** e si indica con \mathcal{F} :

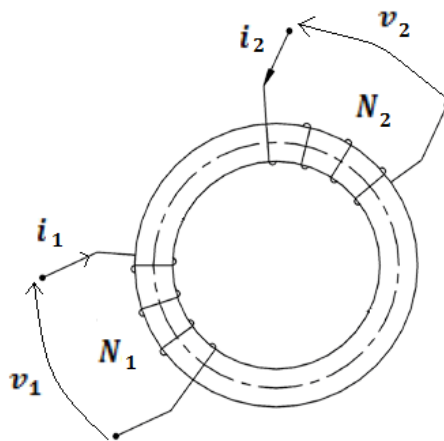
$$\mathcal{F} = \mathcal{R} \Phi$$

Possiamo costruire un circuito elettrico che descrive quello che accade nel toroide. Tale circuito prende il nome di circuito magnetico che è composto da un generatore di forza magnetomotrice, un resistore con resistenza pari alla riluttanza e in cui scorre un flusso magnetico:

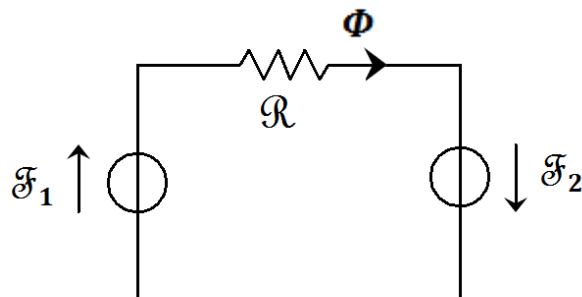


MUTUE INDUTTANZE

Mettiamo caso che sullo stesso toroide avvolgiamo altre N spire attraversate da una corrente i_2 :



La riluttanza, essendo un dato fisico legato alla forma del toroide, non cambia; quello che c'è di nuovo è la forza magnetomotrice generata dal secondo avvolgimento, che andremo ad aggiungere al modello circuitale:



Il verso della nuova forza magnetomotrice dipende a sua volta dal verso dell'avvolgimento da cui deriva. Anche se un po' ortodosso, per capire quale verso e, di conseguenza, quale segno andare ad attribuire alle

due forze generate, possiamo fare ricorso al metodo dello “svitamento della lampadina”: se con la nostra mano simuliamo l’atto di avvitare/svitare una lampadina, possiamo notare che nel primo avvolgimento, se giriamo la mano nel verso indicato dalla freccia che rappresenta la corrente, è come se stessimo avvitando la lampadina e quindi la freccia da rappresentare sul circuito per la forza sarà diretta verso l’alto; mentre per il secondo avvolgimento, il verso assegnato alla corrente fa sì che la mano svita la lampadina e di conseguenza la forza sul circuito verrà rappresentata con una freccia rivolta verso il basso.

Per *sovrapposizione degli effetti*, il flusso totale sarà dato dalla somma dei flussi dovuti ai due avvolgimenti:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$$

N.B.: il primo termine è sempre positivo perché lo fissiamo come riferimento; il flusso dovuto al secondo avvolgimento, invece, può sommarsi (amplificando l’effetto magnetico) o sottrarsi (riducendo l’effetto magnetico) al primo a seconda del verso dell’avvolgimento.

Applicando Hopkins:

$$\Phi_1 = N_1 i_1 / \mathcal{R}$$

$$\Phi_2 = N_2 i_2 / \mathcal{R}$$

ATTENZIONE! Il principio di sovrapposizione degli effetti porta alla formula del flusso totale solo se la riluttanza è lineare. Nel ferro, dove la riluttanza non è lineare, il principio non può essere usato perché il flusso di un nucleo ferroso non risponde linearmente, ossia con rapporti proporzionali, alle sollecitazioni, ma, anzi, si ha il cosiddetto fenomeno dell’**isteresi**.

N.B.: L’isteresi è un fenomeno per cui il valore assunto da una grandezza dipendente da altre (nel nostro caso il flusso) è determinato, oltre che dai valori istantanei di queste ultime, anche dai valori che avevano assunto in precedenza; ovvero, in altre parole, l’isteresi è la caratteristica di un sistema di reagire in ritardo alle sollecitazioni applicate e in dipendenza dello stato precedente.

Per ora immaginiamo di trovarci in una situazione lineare e proseguiamo calcolando le tensioni ai capi degli avvolgimenti:

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} = N_1 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt} = \frac{d(N_1 \Phi_1)}{dt} + \frac{d(N_1 \Phi_2)}{dt} = \frac{d\Phi_{11}}{dt} + \frac{d\Phi_{21}}{dt}$$

Dove:

Φ_{11} = flusso dovuto al primo avvolgimento e concatenato con esso

Φ_{21} = flusso dovuto al secondo avvolgimento, ma concatenato al primo

$$v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt} = \frac{d(N_2 \Phi_1)}{dt} + \frac{d(N_2 \Phi_2)}{dt} = \frac{d\Phi_{12}}{dt} + \frac{d\Phi_{22}}{dt}$$

Dove:

Φ_{12} = flusso dovuto al primo avvolgimento, ma concatenato al secondo

Φ_{22} = flusso dovuto al secondo avvolgimento e concatenato con esso

Ricordando la definizione dell'induttanza e, sostituendo ai due flussi le rispettive espressioni, possiamo scrivere:

$$v_1 = \frac{d(N_1\Phi_1)}{dt} + \frac{d(N_1\Phi_2)}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

Con:

$$M = (N_1N_2) / \mathcal{R}$$

$$v_2 = \frac{d(N_2\Phi_1)}{dt} + \frac{d(N_2\Phi_2)}{dt} = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

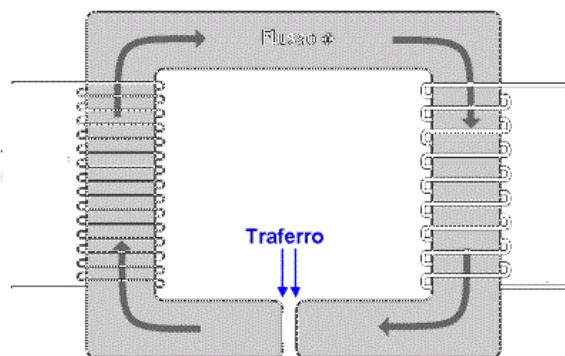
Con:

$$M = (N_2N_1) / \mathcal{R}$$

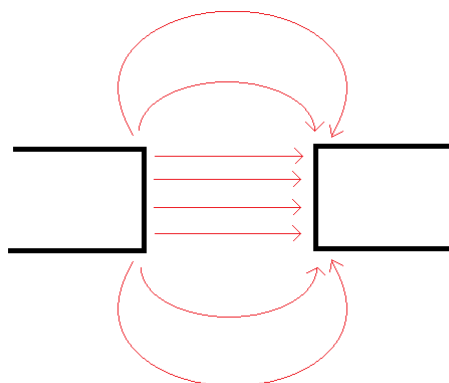
L' M è detto **coefficiente di mutua induzione**.

MATERIALI NON LINEARI FERROMAGNETICI

Come abbiamo detto in precedenza, il ferro non è un materiale lineare. Per linearizzarlo, e per poter quindi applicare il principio di sovrapposizione degli effetti con tutto ciò che ne consegue, è quasi sempre sufficiente effettuare un taglio sul toroide (o comunque sul nucleo ferromagnetico su cui stiamo lavorando) che prende il nome di **traferro**:

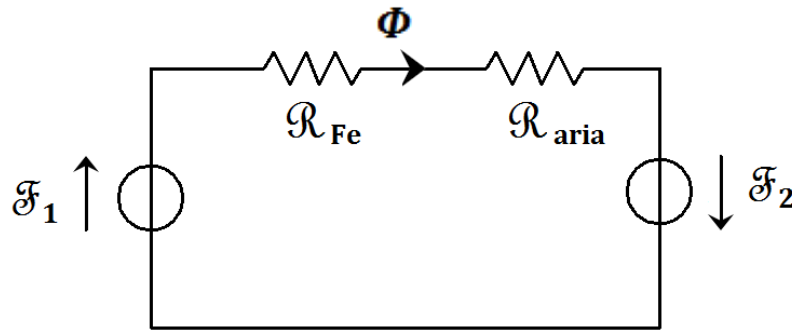


Zoom sul traferro:



Come si nota dallo zoom del traferro possiamo notare che le linee di flusso sono centralmente uguali a quelle che avremmo se il materiale fosse pieno, ma andando verso i bordi si disperdono nell'ambiente. Queste linee di bordo, tuttavia, effettuano percorsi talmente lunghi che possono essere trascurate, a patto, però che la larghezza del traferro sia sufficientemente piccola. Quindi trascurati gli effetti dei bordi, il flusso è interessato dalla stessa sezione trasversale della parte non tagliata.

Quando due oggetti sono percorsi da uno stesso flusso magnetico si rappresentano in serie (come quando abbiamo la stessa corrente che scorre) e quindi passando allo schema circuitale avremo due riluttanze in serie: una del ferro e una relativa all'aria presente nel traferro.



Calcoliamo le riluttanze:

$$\mathcal{R}_{Fe} = \frac{1}{\mu_{Fe}} \frac{\lambda - \delta}{S} \quad \mathcal{R}_{aria} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{S}$$

Con δ larghezza traferro.

Dato che la permeabilità magnetica dell'aria è molto più piccola di quella del ferro, se il rapporto $\frac{\delta}{S}$ non riesce a compensare questo squilibrio dovuto alle μ allora risulta che:

$$\mathcal{R}_{aria} \gg \mathcal{R}_{Fe}$$

E quindi la riluttanza del ferro, grazie all'inserimento del traferro, può essere trascurata e con lei se ne va il problema della non linearità del ferro.

Nei trasformatori, tuttavia, non si effettua il traferro, perché esigendo un flusso magnetico si cerca di esaltare tale flusso rinunciando al traferro dato che la riluttanza rappresenta un limite al flusso. Nelle macchine elettriche, invece, è presente una parte ferromagnetica rotante, il *rotore*, e una parte ferromagnetica statica, detta *statore*; dovendo il rotore ruotare attorno allo statore si rende necessario realizzare uno spazio tra le due parti per poter permettere il movimento, il traferro per l'appunto che permette anche lo studio a livello magnetico delle macchine elettriche rotanti rendendo lineare il problema della non linearità dovuto ai materiali ferromagnetici.

TRASFORMATORE DI POTENZA

Vediamo di cercare uno schema circuitale che rappresenti un **trasformatore di potenza**:



N.B.: in generale si mette in convenzione dei generatori la corrente sulla prima porta, mentre in convenzione degli utilizzatori quella sulla seconda porta.

Il trasformatore di potenza, il cui obiettivo è trasmettere una potenza, è composto da una rete attiva (porta/lato 1) che prende il nome di **primario** e una rete passiva dei carichi (porta/lato 2) denominata **secondario**. Mentre sul secondario può essere imposta la condizione di vuoto, sul primario no, altrimenti non ci sarebbe alcuna potenza da trasmettere.

Immaginiamo di essere in regime permanente sinusoidale e quindi di utilizzare i fasori di corrente e tensione.

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Anche il flusso è sinusoidale e quindi quando andremo a convertire tutto in fasori (ricordando le regole sulle derivate di fasori) avremo che:

$$\bar{V}_1 = j\omega \bar{\Phi} N_1$$

$$\bar{V}_2 = j\omega \bar{\Phi} N_2$$

Effettuando il rapporto tra i due fasori di tensione:

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = \frac{j\omega \bar{\Phi} N_1}{j\omega \bar{\Phi} N_2} = \frac{N_1}{N_2} = k_N$$

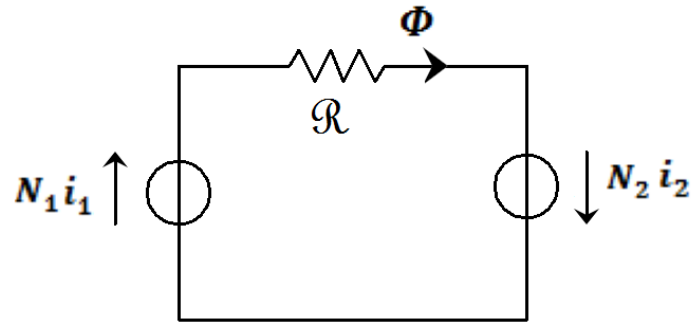
Otteniamo il **rapporto tra le spire** dei due avvolgimenti e possiamo inoltre notare che, non essendo coinvolta alcuna corrente, anche se stessimo a vuoto sul secondario e imponessimo una tensione sul primario, la tensione sul secondario potrebbe essere variata a nostro piacimento perché possiamo scegliere il rapporto tra le spire e quindi ricavare una tensione secondaria \bar{V}_2 più alta (**trasformatore elevatore**) o più bassa (**trasformatore abbassatore**) della tensione primaria \bar{V}_1 .

Se il trasformatore è monofase il rapporto spire coincide direttamente con il rapporto delle tensioni nominali il quale è detto **rapporto di trasformazione k_T** :

$$k_N = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\bar{V}_{1n}}{\bar{V}_{2n}} = k_T$$

n sta per "nominale".

Andiamo a vedere quello che succede alle correnti:



$$N_1 i_1 + N_2 i_2 = \mathcal{R} \Phi \quad \Rightarrow \quad N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = \mathcal{R} \bar{\Phi}$$

Se mettiamo in cortocircuito il secondario avremo che la tensione \bar{V}_2 è nulla e per non avere una forma indeterminata anche \bar{V}_1 dovrà essere nulla. D'altro canto se \bar{V}_2 è zero, per la legge:

$$\bar{V}_2 = j\omega \bar{\Phi} N_2$$

Anche il flusso $\bar{\Phi}$ è nullo e, di conseguenza, avremo che:

$$N_1 \bar{I}_1 + N_2 \bar{I}_2 = 0 \quad \text{in cto - cto}$$

Da cui:

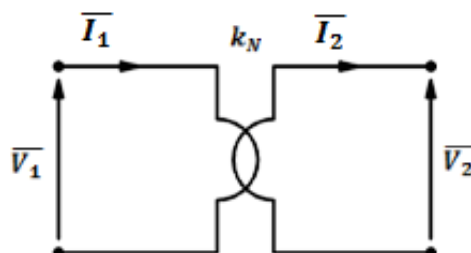
$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{1}{k_N}$$

DAL TRASFORMATORE IDEALE A QUELLO REALE

In condizioni di cortocircuito quindi ci troviamo di fronte a una situazione ambigua perché dal punto di vista delle correnti riusciamo a trovare una relazione, ma dal punto di vista delle tensioni crolla il modello a vuoto perché è impossibile avere una tensione alla rete attiva nulla. Occorre quindi partire da una *situazione astratta* per poter risolvere il problema in cui \bar{V}_1 e \bar{V}_2 non saranno più tensioni misurabili ai morsetti. Quello che modelleremo sarà dunque un **trasformatore ideale**, cioè inesistente e non realizzabile, che sfrutterà le due relazioni paradossali che abbiamo scoperto in precedenza:

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = k_N \quad \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = -\frac{1}{k_N}$$

Lo schema circuitale che rappresenta il trasformatore ideale è il seguente:

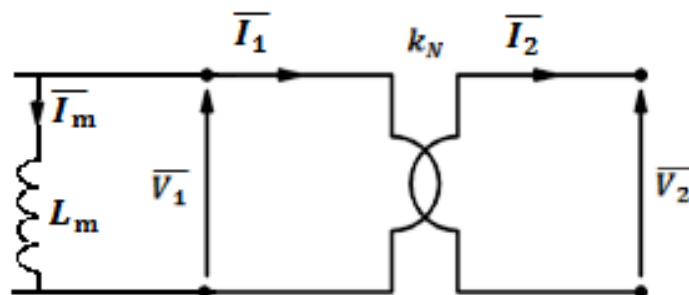


A partire dal trasformatore ideale dovremo arrivare a individuare la tensione e la corrente del primario e del secondario misurabili ai morsetti:



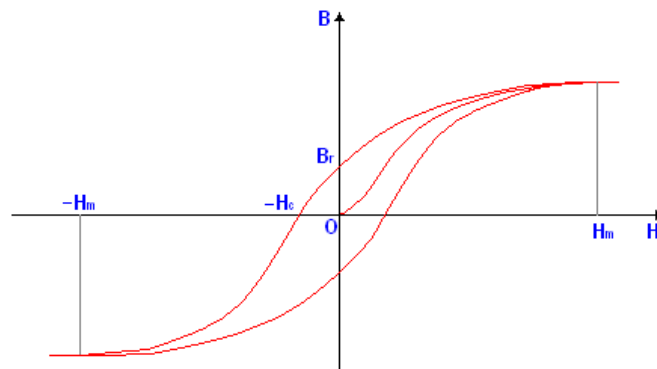
Prima considerazione: se fossimo in condizioni di vuoto la \overline{I}_1 sarebbe nulla, cosa che non può essere perché nel primario avviene la trasmissione di potenza elettrica la quale sarebbe nulla qualora la corrente \overline{I}_1 fosse pari a zero.

Dunque la \overline{I}_P deve essere per questo motivo diversa da \overline{I}_1 ; per garantire ciò inseriamo un *nodo interno* dove la corrente primaria si ramifica in corrente \overline{I}_1 e in un'altra corrente che chiameremo **corrente di magnetizzazione** che fa sì che a vuoto l'unico flusso prodotto è quello generato dal primario e (che prende il nome di **flusso di magnetizzazione**). La corrente di magnetizzazione, se siamo in condizioni di vuoto in cui l'unico dispositivo che genera flusso è il primario, va ad alimentare un induttore non lineare o lineare a seconda del materiale (nel caso di materiale non lineare è possibile dimostrare che gli effetti dovuti alla non linearità sono così poco incidenti che possiamo rendere lineare la situazione. Inoltre dall'esperienza risulta che la corrente di magnetizzazione è di intensità molto bassa). Il circuito sarà quindi modificato:



Osserviamo che a vuoto, cioè quando le correnti \overline{I}_1 e \overline{I}_2 sono nulle, nel circuito scorre ancora la corrente di magnetizzazione \overline{I}_m che, pur essendo molto piccola, provoca perdite joule che nella realtà riscaldano il trasformatore. Il perché la corrente di magnetizzazione riscalda molto il trasformatore è da ricercarsi nelle cosiddette **perdite nel ferro** che si dividono in due classi: le **perdite per isteresi** e le **perdite per correnti parassite**.

PERDITE PER ISTERESI



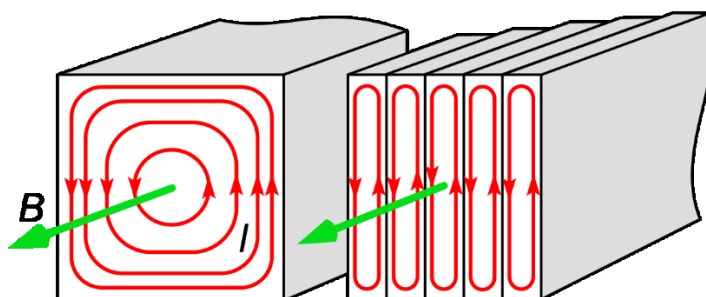
A partire dal momento in cui i campi sono nulli, e dunque è nulla la magnetizzazione del materiale, il campo magnetico aumenta seguendo la curva OH_m , detta **curva di prima magnetizzazione**, fino al valore massimo di H_m in cui \mathbf{B} aumenta proporzionalmente a $\mu\mathbf{H}$.

Diminuendo la corrente, diminuisce di conseguenza \mathbf{H} , senza tuttavia ripercorrere la stessa curva, ma la curva H_mB_r . Per $\mathbf{H} = 0$ risulta quindi che il campo magnetico non ritorna ad avere un valore nullo, ma acquista un'intensità pari a $|\mathbf{B}| = B_r > 0$. Tale valore è detto **magnetizzazione residua**.

A causa del fenomeno dell'isteresi magnetica, l'energia fornita al nucleo durante la fase di magnetizzazione non viene interamente restituita durante quella di smagnetizzazione, ma, ad ogni ciclo, rimane immagazzinata nel nucleo magnetico una quantità di energia proporzionale all'area del ciclo stesso e alla quale possiamo associare un valore di potenza che coinciderà con le perdite per isteresi.

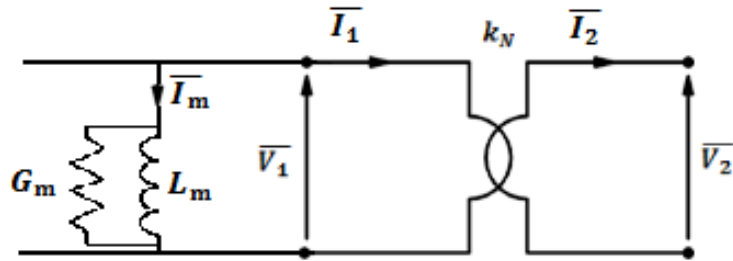
PERDITE PER CORRENTI PARASSITE

Il nucleo ferroso non è soltanto un buon conduttore magnetico ma è pure un buon conduttore elettrico. Se osserviamo una sezione trasversale del nucleo di ferro in cui il flusso magnetico è uscente dal foglio della pagina, notiamo che in ogni ipotetica spira che possiamo tracciare all'interno del nucleo è possibile misurare una f.e.m. che, dato che il ferro è conduttore, sposta le cariche e genera *correnti vorticosi* alle quali si associano delle perdite joule che, se sommate, vanno a costituire le perdite per correnti parassite:

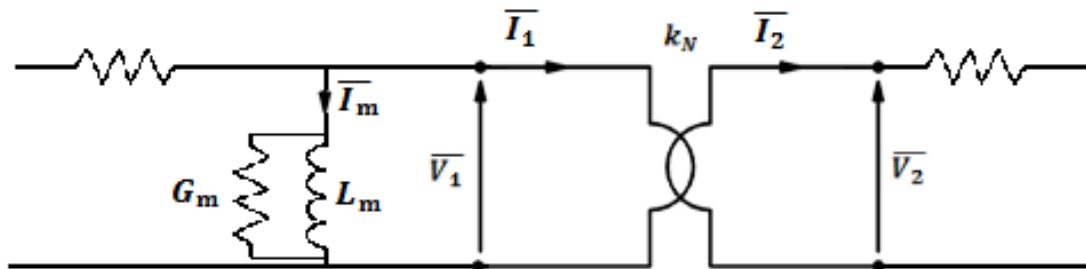


Come è possibile notare nella figura sopra, si possono attenuare queste perdite suddividendo il nucleo magnetico in sottili strati, elettricamente isolati (**lamierini**). In questo modo gli elettroni non possono attraversare lo strato isolante tra i lamierini e l'area racchiusa dal loro percorso viene ridotta.

Per tener conto delle perdite di ferro affianco all'induttore inseriamo un resistore con resistenza G_m :



Sistemati gli elementi trasversali, aggiungiamo due resistori longitudinali sia al primario che al secondario poiché gli avvolgimenti sono fatti di rame:

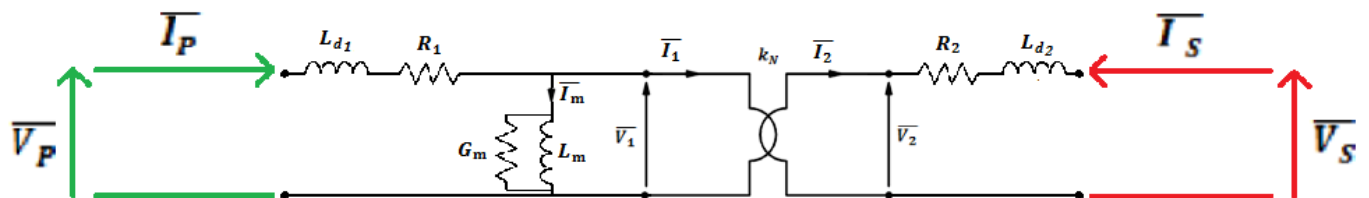


L'ultimo effetto da tenere presente è quello legato al **flusso magnetico disperso nell'aria**, cioè non tutte le linee di flusso scorrono nel ferro ma alcune si disperdono nell'aria, concatenandosi ad essa e senza arrivare all'altra bobina. In altre parole non tutto il flusso generato dalla corrente \bar{I}_1 arriva al secondo avvolgimento perché una parte si disperde nell'ambiente.

Per tener conto di questo fenomeno si aggiunge un induttore al primario in modo tale che la corrente reale \bar{I}_P disperde parte del flusso che essa genera proprio attraverso l'induttore la cui induttanza è detta **induttanza di dispersione primaria**.

È evidente che se attacchiamo un carico alla rete, avremo una corrente \bar{I}_2 che reagisce e genera flusso all'interno del nucleo; e anche qui una quota parte del flusso si disperde nell'aria, rendendo così necessario l'inserimento di un induttore anche al secondario a simulare il fenomeno.

A questo punto lo schema circuitale per il trasformatore di potenza è completo e basta aggiungere i morsetti accessibili al primario e al secondario con le relative grandezze misurabili:



In definitiva abbiamo che:

$$\bar{I}_P = \bar{I}_1 + \bar{I}_m$$

$$|\bar{I}_1| \gg |\bar{I}_m|$$

CASO CON CARICO COLLEGATO

$$\overline{I_P} = \overline{I_1} \quad \text{con } \overline{I_m} \text{ trascurabile}$$

CASO A VUOTO

$$\begin{aligned}\overline{V_2} &= 0 \\ \overline{I_S} = \overline{I_2} = \overline{I_1} &= 0 \\ \overline{I_P} &= \overline{I_m}\end{aligned}$$

CASO CTO-CTO

Nel caso di cortocircuito la $\overline{V_S} = 0$ ma la $\overline{V_2}$ no, perché non coincide con la tensione secondaria e quindi quel problema della forma indeterminata che si aveva quando $\overline{V_2}$ era zero ora è risolto.

Quindi l'aver adottato uno schema astratto di partenza ci ha permesso di conciliare tra loro i casi di cortocircuito e di vuoto che all'inizio ci creavano delle situazioni ambigue.

Ultime nozioni sul trasformatore ideale...

Il trasformatore ideale è detto **trasparente alla potenza**, cioè la potenza che entra nella porta uno è uguale alla potenza che esce dalla porta due:

$$\overline{V_1} \overline{I_1}^* = \overline{V_2} \overline{I_2}^*$$

Questa equazione è valida se non consideriamo le perdite nel rame (dovute ai resistori R1 e R2) e nel ferro (dovute al resistore G_m) che si hanno nella trasmissione da primario a secondario. Se consideriamo anche le perdite occorre introdurre il concetto di **rendimento**, ossia il rapporto tra la potenza secondaria, misurata ai morsetti del secondario, e la somma della potenza trasmessa al primario con le perdite joule secondarie:

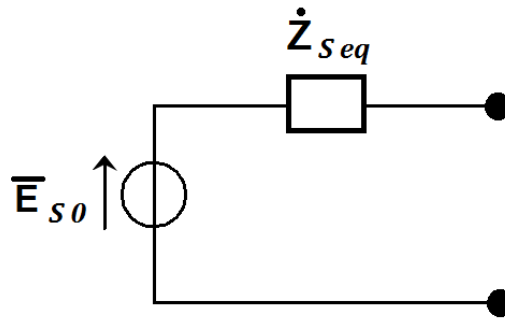
$$\eta = \frac{P_S}{P_P + P_{JS}}$$

È possibile dimostrare che i trasformatori di potenza raggiungono il massimo del rendimento al 75% del carico.

Vediamo ora come vengono utilizzati i trasformatori di potenza negli impianti di bassa tensione...

IMPIANTI DI BASSA TENSIONE

Dato che il modello del trasformatore è lineare allora possiamo riassumere lo schema circuitale del trasformatore, applicando Thevenin, con una rappresentazione esterna composta da un generatore di tensione che eroga una tensione secondaria a vuoto $\overline{E_{S0}}$ in serie a un'impedenza $\overline{Z_{Seq}}$:



N.B.: \bar{E}_{S0} è la tensione a vuoto misurata tra i morsetti del secondario ($\bar{I}_S = 0$); \dot{Z}_{Seq} è l'impedenza equivalente della rete resa passiva inserendo un cortocircuito dove è presente la tensione primaria che rendeva attiva la rete.

I dati \dot{Z}_{Seq} e \bar{E}_{S0} sono dedotti attraverso due prove effettuate dai costruttori i cui risultati vengono inseriti nei dati di targa della macchina elettrica: la **prova a vuoto** e la **prova in cto-cto**.

LA PROVA A VUOTO

Nella prova a vuoto il trasformatore viene alimentato al primario con una tensione che prende il nome di **tensione nominale primaria** che nel caso in cui il trasformatore sia monofase è pari a 220 V moltiplicato per $\sqrt{2}$; la **frequenza nominale** di rete usata in Italia è di 50 Hz.

L'obiettivo di questa prova è la misurazione della tensione secondaria \bar{V}_S . Si controlla il rapporto di trasformazione, che nel caso monofase coincide con il rapporto spire:

$$k_T = \frac{|\bar{V}_P|}{|\bar{V}_S|} = k_N$$

Con un wattmetro collegato al primario misuriamo la potenza ricordando che la potenza sul secondario è nulla, dato che stiamo misurando in condizioni di vuoto, e che sono comunque presenti le perdite del ferro e le perdite joule secondarie.

Siccome la corrente che rileviamo attraverso un amperometro risulta essere molto più piccola della corrente nominale, cioè di quella per la quale ho progettato il trasformatore, attribuiamo la misura della potenza effettuata in precedenza principalmente alle perdite del ferro trascurando le joule secondarie.

Il costruttore, tuttavia, invece di assegnare un valore secco delle perdite del ferro, ci fornisce il valore delle **perdite del ferro in percentuale**:

$$P_{Fe}\% = \frac{P_{Fe}}{A_n} \cdot 100$$

Dove P_{Fe} è la potenza misurata a vuoto e A_n è uno dei dati di targa che troveremo stampati e rappresenta la **potenza apparente nominale** del trasformatore. Viene fornito il valore apparente della potenza, e non per esempio quello attivo o reattivo, perché il costruttore è ignaro dell'uso che l'utente farà del dispositivo e quindi che tipo di carico verrà collegato ad esso: se, per esempio, il carico fosse puramente resistivo la potenza apparente coinciderebbe, a meno delle perdite, con la potenza attiva.

Quindi con la prova a vuoto i dati di targa ottenibili saranno: $\bar{V}_P, \bar{V}_S, A_n$.

LA PROVA IN CTO-CTO

L'obiettivo di questa seconda prova è il dimensionamento dell'impedenza equivalente e consiste nel chiudere i morsetti del secondario in cortocircuito. Stavolta però non possiamo alimentare a tensione piena il primario perché potremmo incorrere in gravi incidenti (fusione o esplosione del trasformatore) ma trasmettiamo una **tensione detta di cortocircuito primaria** che è considerevolmente più bassa della tensione piena. È possibile ricavare il valore di questa tensione di cortocircuito a partire da dati di partenza noti come la potenza apparente del trasformatore A_n e la tensione secondaria \bar{V}_S :

$$A_n = \bar{V}_S \bar{I}_{S n}$$

Da cui ricavo il valore della **corrente ottimale** $\bar{I}_{S n}$ che supporta il trasformatore. Noto tale valore, colleghiamo un amperometro ai morsetti del secondario e un variatore di tensione al primario e cominciamo ad aumentare gradualmente la tensione al primario fintanto che la tensione che stiamo imponendo farà risultare sull'amperometro il valore $\bar{I}_{S n}$: il valore che leggiamo sul variatore è proprio la tensione di cortocircuito primaria $\bar{V}_{cc P}$ che comparirà tra i dati di targa. Anche quest'ultimo dato non viene fornito con il suo valore netto ma viene espresso in percentuale rispetto alla tensione nominale primaria:

$$\bar{V}_{cc P} \% = \frac{\bar{V}_{cc P}}{\bar{V}_{P n}} \cdot 100$$

La potenza assorbita in queste condizioni è prevalentemente dissipata nel rame degli avvolgimenti per effetto Joule, mentre risulta in pratica trascurabile quella persa nel ferro (il flusso è ridotto in proporzione alla tensione di alimentazione $\bar{V}_{cc P}$, che ricordiamo essere molto più piccola della tensione nominale):

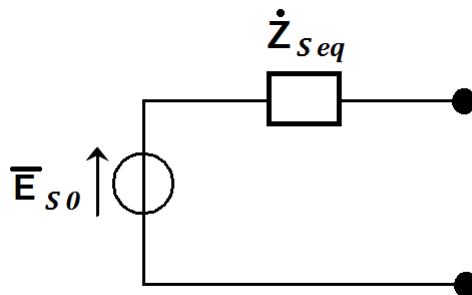
$$P_{cc} \cong P_{R1} + P_{R2}$$

il cui valore in percentuale sarà:

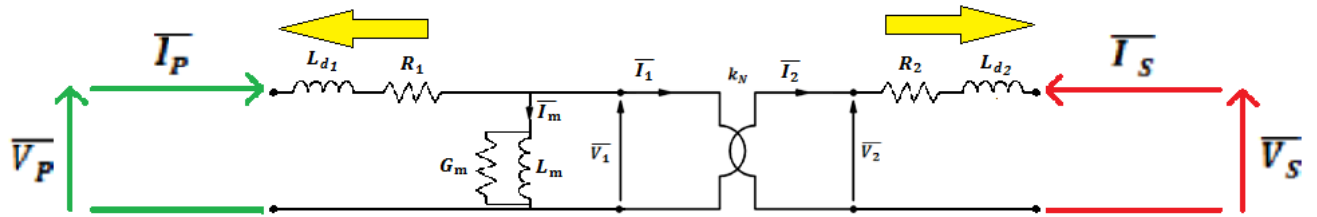
$$P_{cc n} \% = \frac{P_{cc}}{A_n} \cdot 100$$

DETERMINAZIONE DELL'IMPEDEENZA EQUIVALENTE

Per dimensionare l'impedenza equivalente a partire dai dati che abbiamo ricavato dalla prova riutilizziamo il teorema di Thevenin anche per la prova in cto-cto:

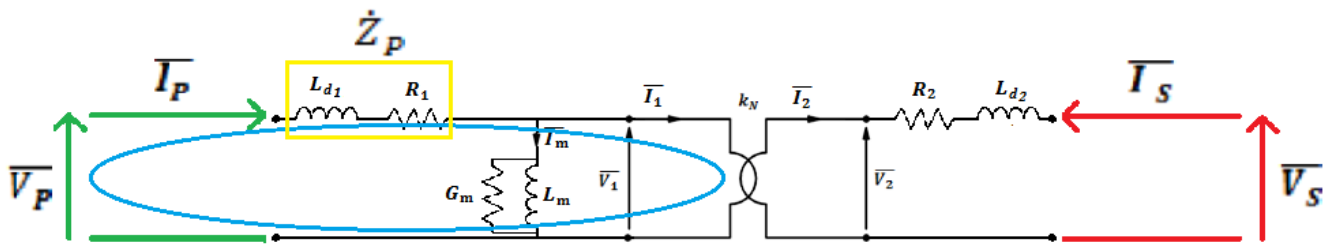


Se abbiamo una tensione di cortocircuito primario $\bar{V}_{cc P}$ ai morsetti del primario, per arrivare alla rappresentazione Thevenin non posso semplicemente trasportarla direttamente fino a \bar{V}_2 perché nel mezzo abbiamo cadute di tensione dovute sia alle resistenze del primario che del secondario (indicate con le frecce gialle nella figura sotto):



COME RIPORTARE L'IMPEDEZZA PRIMARIA AL SECONDARIO

Tuttavia è possibile riportare, sotto forma di un altro modello, tutto il blocco primario al secondario in modo tale che \bar{V}_P coincida con \bar{V}_1 . Scriviamo la legge di Kirchhoff per la maglia indicata in figura in blu:



$$\bar{V}_P - \dot{Z}_P \bar{I}_P - \bar{V}_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_P - \dot{Z}_P \bar{I}_P = \bar{V}_1$$

Ricordando che in condizioni di cto-cto (ma vale anche quando un carico è collegato):

$$\bar{I}_P = \bar{I}_1 \quad \text{con } \bar{I}_m \text{ trascurabile}$$

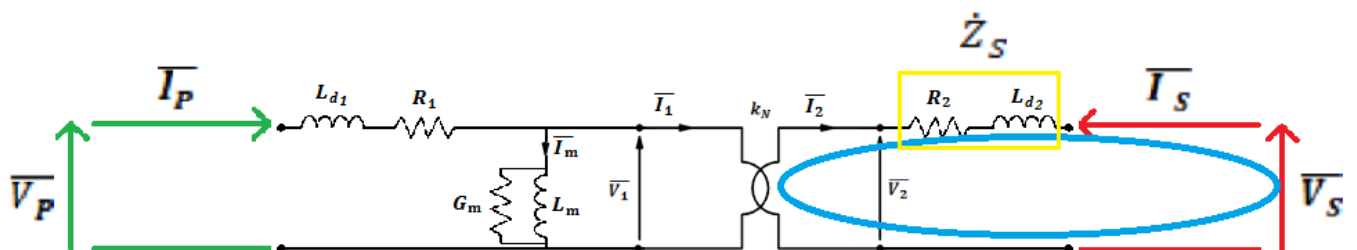
$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{\bar{I}_P}{\bar{I}_2} = -\frac{1}{k_N} \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_P = -\frac{\bar{I}_2}{k_N}$$

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = k_N \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_1 = k_N \bar{V}_2$$

Sostituendo all'equazione di maglia otteniamo:

$$\bar{V}_P + \dot{Z}_P \frac{\bar{I}_2}{k_N} = k_N \bar{V}_2 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_2 = \frac{\bar{V}_P}{k_N} + \dot{Z}_P \frac{\bar{I}_2}{k_N^2}$$

Scriviamo ora il principio di Kirchhoff all'altra maglia:



$$\bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S - \bar{V}_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S = \bar{V}_2$$

Se uguagliamo le due espressioni ottenute per la tensione \bar{V}_2 avremo che:

$$\frac{\bar{V}_P}{k_N} + \dot{Z}_P \frac{\bar{I}_2}{k_N^2} = \bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S$$

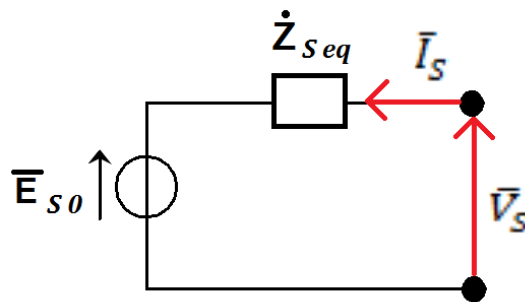
Da cui:

$$\frac{\bar{V}_P}{k_N} = \bar{V}_S - \dot{Z}_P \frac{\bar{I}_2}{k_N^2} - \dot{Z}_S \bar{I}_S$$

Siccome stiamo trasferendo potenza dal primario al secondario e quindi nel secondario non è presente un nodo interno che deriva la corrente primaria (vedi lezione precedente) allora $\bar{I}_S = \bar{I}_2$ e quindi avremo che:

$$\frac{\bar{V}_P}{k_N} = \bar{V}_S - \left(\frac{\dot{Z}_P}{k_N^2} + \dot{Z}_S \right) \bar{I}_S$$

Dove la \bar{V}_S è la tensione che misuro ai capi del secondario e la corrente che circola è la \bar{I}_S :



Se applichiamo Kirchhoff al modello equivalente sopra:

$$\bar{E}_{S0} - \bar{V}_S + \dot{Z}_{Seq} \bar{I}_S = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{E}_{S0} = \bar{V}_S - \dot{Z}_{Seq} \bar{I}_S$$

Per confronto possiamo dedurre che:

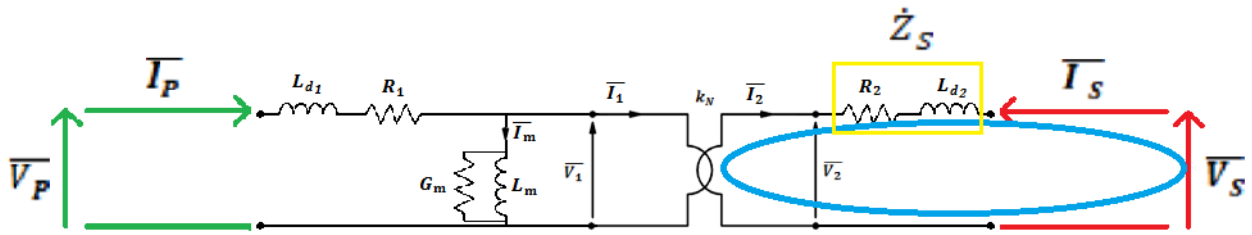
$$\bar{E}_{S0} = \frac{\bar{V}_P}{k_N} \quad \dot{Z}_{Seq} = \frac{\dot{Z}_P}{k_N^2} + \dot{Z}_S$$

La $\dot{Z}_{Seq} \bar{I}_S$ si compone di due termini: $\dot{Z}_S \bar{I}_S = \bar{V}_S$, che è la tensione secondaria effettiva che possiede il trasformatore; mentre il prodotto $\frac{\dot{Z}_P}{k_N^2} \bar{I}_S$ è l'impedenza del primario riportata al secondario.

È possibile dimostrare che se avessimo studiato il caso inverso, ossia avessimo riportato a un lato Thevenin la rete passiva anziché l'attiva, a fine dei conti avremmo trovato che per passare l'impedenza dal secondario al primario avremo dovuto moltiplicare \dot{Z}_S per k_N^2 invece di dividere.

COME RIPORTARE L'IMPEDENZA SECONDARIA AL PRIMARIO

Scriviamo la legge di Kirchhoff per la maglia indicata in figura in blu:



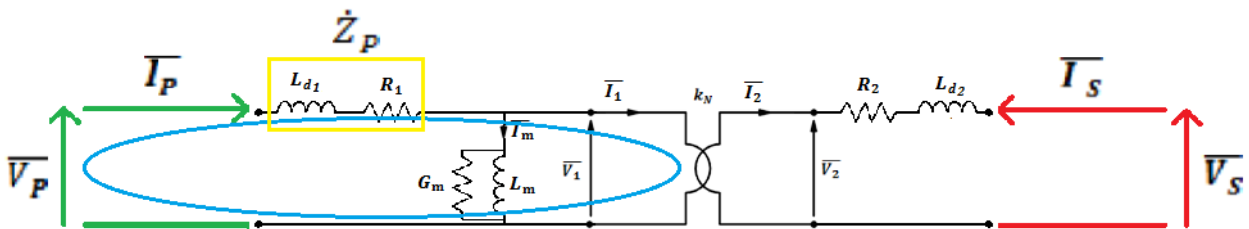
$$\bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S - \bar{V}_2 = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S = \bar{V}_2$$

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_2} = k_N \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_2 = \frac{\bar{V}_1}{k_N}$$

Sostituendo all'equazione di maglia otteniamo:

$$\bar{V}_S - \dot{Z}_S \bar{I}_S = \frac{\bar{V}_1}{k_N} \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_1 = \bar{V}_S k_N - \dot{Z}_S \bar{I}_S k_N$$

Scriviamo ora il principio di Kirchhoff all'altra maglia:



$$\bar{V}_P - \dot{Z}_P \bar{I}_P - \bar{V}_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_P - \dot{Z}_P \bar{I}_P = \bar{V}_1$$

Se uguagliamo le due espressioni ottenute per la tensione \bar{V}_2 avremo che:

$$\bar{V}_S k_N - \dot{Z}_S \bar{I}_S k_N = \bar{V}_P - \dot{Z}_P \bar{I}_P$$

Da cui:

$$\bar{V}_S k_N = \bar{V}_P + \dot{Z}_S \bar{I}_S k_N - \dot{Z}_P \bar{I}_P$$

Siccome stiamo trasferendo potenza dal primario al secondario e quindi nel secondario non è presente un nodo interno che deriva la corrente primaria (vedi lezione precedente) allora $\bar{I}_S = \bar{I}_2$ e quindi avremo che:

$$\frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_2} = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_S} = -\frac{1}{k_N} \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_S = -\bar{I}_1 k_N$$

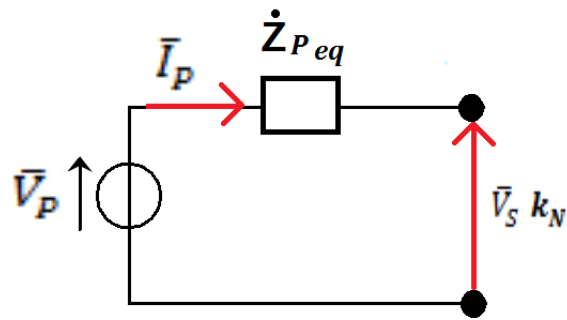
Ricordando, inoltre, che in condizioni di cto-cto:

$$\bar{I}_P = \bar{I}_1 \quad \text{con } \bar{I}_m \text{ trascurabile}$$

L'equazione diventa:

$$\bar{V}_S k_N = \bar{V}_P - \dot{Z}_S \bar{I}_P k_N^2 - \dot{Z}_P \bar{I}_P \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_S k_N = \bar{V}_P - (\dot{Z}_S k_N^2 + \dot{Z}_P) \bar{I}_P$$

Dove la \bar{V}_P è la tensione che misuro ai capi del primario e la corrente che circola è la \bar{I}_P :



Se applichiamo Kirchhoff al modello equivalente sopra:

$$\bar{V}_P - \bar{V}_S k_N + \dot{Z}_{P eq} \bar{I}_P = 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{V}_P = \bar{V}_S k_N - \dot{Z}_{P eq} \bar{I}_P$$

Per confronto possiamo dedurre che:

$$\bar{V}_P = \bar{V}_S k_N \quad \dot{Z}_{P eq} = \dot{Z}_S k_N^2 + \dot{Z}_P$$

La $\dot{Z}_{P eq} \bar{I}_P$ si compone di due termini: $\dot{Z}_P \bar{I}_P = \bar{V}_P$, che è la tensione primaria effettiva che possiede il trasformatore; mentre il prodotto $\dot{Z}_S k_N^2 \bar{I}_P$ è l'impedenza del secondario riportata al primario.

Una volta capito come passare le grandezze da primario a secondario e viceversa possiamo riprendere la tensione di cortocircuito primaria e riportarla al secondario:

$$\bar{V}_{ccS} = \frac{\bar{V}_{ccP}}{k_N}$$

A questo punto possiamo ricavare il valore dell'impedenza equivalente secondaria perché:

$$\dot{Z}_{S eq} \bar{I}_{Sn} = \bar{V}_{ccS} \quad \Rightarrow \quad |\dot{Z}_{S eq}| = \frac{\bar{V}_{ccS}}{\bar{I}_{Sn}} = \frac{\bar{V}_{ccP}}{k_N} \frac{1}{\bar{I}_{Sn}}$$

Sapendo che:

$$\bar{V}_{ccP} = \frac{\bar{V}_{ccP\%}}{100} \bar{V}_{Pn} = \frac{\bar{V}_{ccP\%}}{100} \bar{V}_{Sn} k_N$$

Otteniamo:

$$|\dot{Z}_{S eq}| = \frac{\bar{V}_{ccP}}{k_N \bar{I}_{Sn}} = \left(\frac{\bar{V}_{ccP\%}}{100} \bar{V}_S k_N \right) \frac{1}{k_N \bar{I}_{Sn}} = \frac{\bar{V}_{ccP\%} \cdot \bar{V}_{Sn}}{100} \frac{1}{\bar{I}_{Sn}}$$

Ricordando che:

$$A_n = \bar{V}_{Sn} \bar{I}_{Sn} \quad \Rightarrow \quad \bar{I}_{Sn} = \frac{A_n}{\bar{V}_{Sn}}$$

$$|\dot{Z}_{S eq}| = \frac{\bar{V}_{ccP\%}}{100} \frac{\bar{V}_{Sn}^2}{A_n}$$

Dove in verde sono stati evidenziati i **dati di targa**.

INDIVIDUAZIONE DELLA PARTE REALE E IMMAGINARIA DELL'IMPEDENZA EQUIVALENTE

L'aver trovato il modulo dell'impedenza equivalente, tuttavia, non completa le informazioni su di essa perché essendo un operatore complesso \dot{Z}_{Seq} è composta da una parte immaginaria e una reale:

$$\dot{Z}_{Seq} = R_{Seq} + jX_{Seq}$$

La parte reale è responsabile delle perdite joule e tiene quindi conto della potenza attiva; la parte immaginaria invece tiene conto della potenza reattiva. Nel nostro caso, visto che si tratta di un'impedenza equivalente riportata al secondario terrà conto di tutte le perdite joule, mentre la parte immaginaria tiene conto dei flussi dispersi e quindi della potenza reattiva che dobbiamo fornire al trasformatore per alimentare i flussi dispersi in aria.

N.B.: le perdite nel ferro sono trascurate in quanto abbiamo utilizzato un modello Thevenin equivalente che non le contempla (derivato dalla prova in cto-cto). Saranno poi considerate nel momento in cui passiamo a un modello Thevenin equivalente derivante dalla prova a vuoto.

Per individuare la parte reale focalizziamo l'attenzione sulle perdite joule dovute al rame di cui è fatta l'impedenza. Sfruttiamo nuovamente i dati di targa ricavati dalla prova in cto-cto (dove sono trascurate le perdite del ferro):

$$R_1 |\bar{I}_{Pn}|^2 + R_2 |\bar{I}_{Sn}|^2 = P_{ccn}$$

Portando al secondario sia la R_1 che la \bar{I}_{Pn} , con le stesse modalità con cui avevamo riportato l'intera impedenza, possiamo scrivere:

$$P_{ccn} = R_{Seq} |\bar{I}_{Sn}|^2$$

Esprimendo P_{ccn} e \bar{I}_{Sn} attraverso dati di targa otteniamo che:

$$R_{Seq} = \frac{P_{ccn\%}}{100} \frac{\bar{V}_{Sn}^2}{A_n}$$

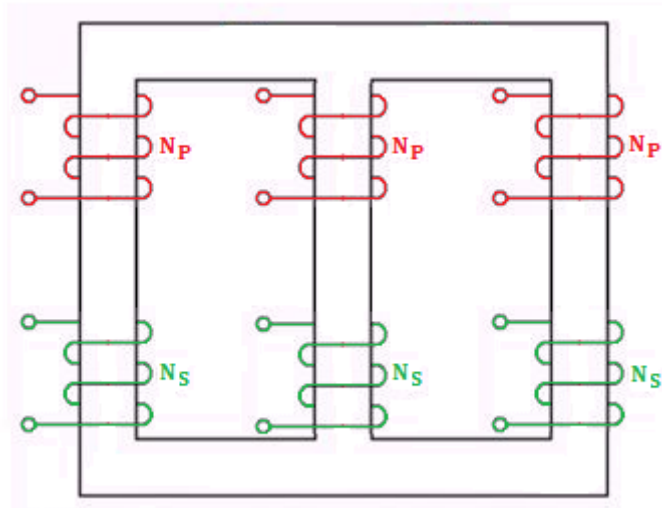
Per ricavare la parte immaginaria, invece, sapendo che \dot{Z}_{Seq} rappresenta un vettore sul piano di Gauss è possibile ricavare la parte immaginaria di tale vettore semplicemente applicando il teorema di Pitagora:

$$X_{Seq} = \sqrt{\dot{Z}_{Seq}^2 - R_{Seq}^2}$$

N.B.: possiamo notare da quest'ultima espressione che la $P_{ccn\%}$ è più piccola della $V_{ccn\%}$, cioè le di perdite rame percentuale saranno sempre minori della tensione in cortocircuito percentuale.

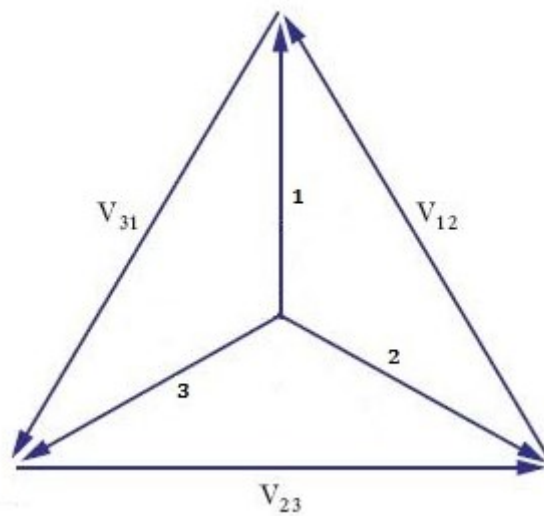
TRASFORMATORE TRIFASE

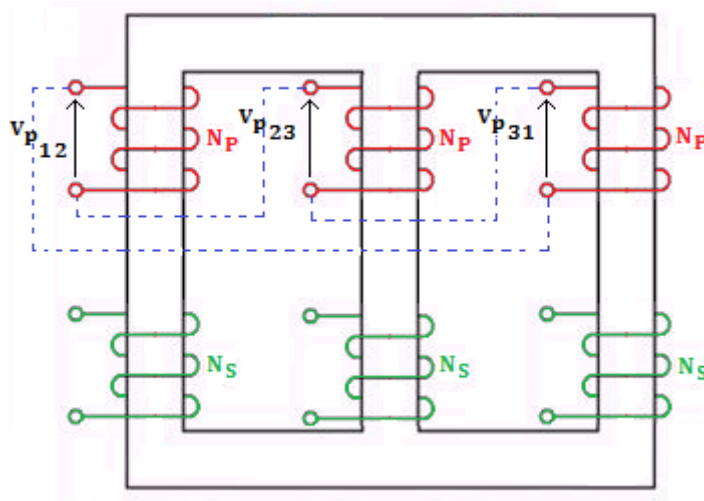
Studiamo lo schema trifase di un trasformatore media-bassa tensione detto a **tre colonne** (a ogni colonna corrisponde una fase):



Per ogni colonna sono previsti due avvolgimenti (con le relative N spire): uno per il primario e uno per il secondario.

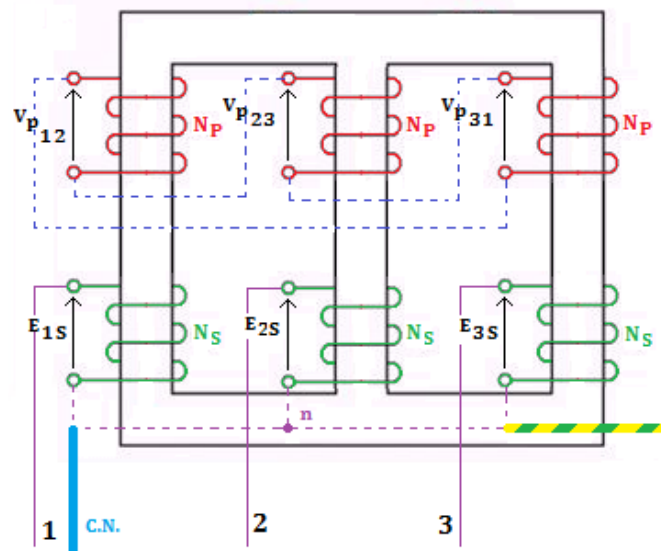
Nella maggior parte dei casi, i morsetti degli avvolgimenti del primario (in media o alta tensione) in un trasformatore trifase vengono collegati in modo da formare un triangolo che si rifà alla configurazione matematica del triangolo delle tensioni concatenate:





Per quanto riguarda il secondario (a bassa tensione), in una delle precedenti lezioni, avevamo visto che per i sistemi trifase a media e bassa tensione abbiamo la necessità di inserire un filo neutro e di creare fisicamente un centro stella (cosa che nel primario rimaneva puramente ideale, legata a un concetto matematico espresso dal triangolo delle tensioni). Quindi dai tre avvolgimenti dovranno uscire quattro fili (tre di fase più il neutro).

Il centro stella può essere creato unendo o i tre morsetti superiori o quelli inferiori per poi far uscire il cavo neutro (c.n.). Mettiamo caso di unire quelli inferiori:



N.B.: come si può notare in figura dal neutro fuoriesce non solo il cavo blu ma anche un cavo giallo-verde con il quale si indica il conduttore che porta all'impianto locale di terra.

Le tensioni che misuriamo ai morsetti corrispondono con le tre tensioni stellate. Nelle tensioni stellate e nelle tensioni primarie che condividono la stessa colonna scorre lo stesso flusso. Ad esempio:

$$\overline{V_{P12}} = j\omega N_P \overline{\Phi_1}$$

$$\overline{E_{1S}} = j\omega N_S \overline{\Phi_1}$$

Se estraiamo i moduli delle tensioni e ne facciamo il rapporto scopriamo che:

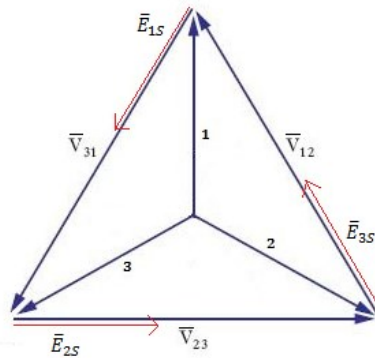
$$\frac{V_{P12}}{E_{1S}} = \frac{N_P}{N_S} = k_N$$

Se nel caso monofase avevamo visto che il rapporto spire coincideva con il rapporto di trasformazione, ora non più perché quest'ultimo è definito come rapporto tra le tensioni nominali e E_{1S} non è una tensione nominale. Quindi il rapporto di trasformazione in un trasformatore trifase triangolo-stella sarà:

$$k_T = \frac{V_{P12}}{V_{S12}} = \frac{V_{P12}}{\sqrt{3} E_{1S}} = \frac{k_N}{\sqrt{3}}$$

Se i versi delle correnti che attraversano gli avvolgimenti sia del primario che del secondario sono tutti entranti nel trasformatore i corrispettivi flussi avranno lo stesso segno e quindi \bar{V}_{P12} e \bar{E}_{1S} avranno stesso verso, stessa direzione e modulo dipendente dal rapporto spire:

$$\bar{V}_{P12} = \bar{E}_{1S} k_N$$



DATI DI TARGA

Anche per il trasformatore trifase vengono forniti i seguenti dati di targa:

$$\text{potenza apparente nominale} = A_n = \sqrt{3} \bar{V}_S \bar{I}_S = \sqrt{3} \bar{V}_P \bar{I}_P$$

Dove $\bar{V}_S = \bar{V}_P$ per l'ipotesi di trasparenza alla potenza.

$$\text{rapporto di trasformazione} = k_T = \frac{\bar{V}_P}{\bar{V}_S}$$

$$\text{tensione di cto - cto percentuale} = \bar{V}_{cc} \% = \frac{\bar{V}_{cc P n}}{\bar{V}_{P n}} \cdot 100 = \frac{\bar{V}_{cc S n}}{\bar{V}_{S n}} \cdot 100$$

$$\text{perdite rame percentuale} = P_{cc n} \% = \frac{P_{cc}}{A_n} \cdot 100 = \frac{3 R_{Seq} |\bar{I}_{S n}|^2}{A_n} \cdot 100$$

$$\text{perdite ferro percentuale} = P_{Fe} \% = \frac{P_{Fe}}{A_n} \cdot 100$$

NUOVI DATI DI TARGA

A differenza del monofase, nel trasformatore trifase si aggiungono **nuovi dati di targa** che ci informano sul tipo di collegamento che viene realizzato al primario e al secondario:

Pertanto un trasformatore trifase viene classificato mediante una sigla composta da:

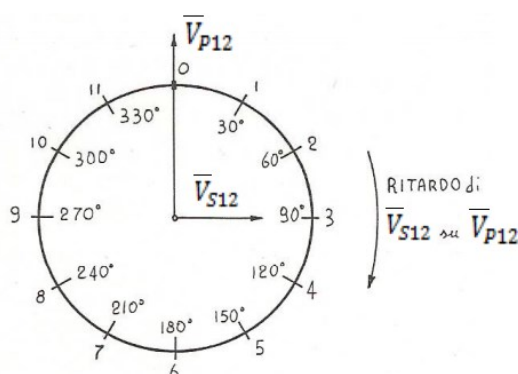
- un **carattere maiuscolo** (Y per la stella, D per il triangolo) che denota il tipo di collegamento dal lato **AT** (alta tensione)

- un **carattere minuscolo** (y per la stella, d per il triangolo) che denota il tipo di collegamento dal lato **bt** (bassa tensione)
- un numero che denota il **gruppo di collegamento**
- se un avvolgimento è a stella e il centro è collegato al neutro si aggiunge alla sigla il carattere **n**.

INDIVIDUAZIONE DEL GRUPPO DI COLLEGAMENTO

Lo **spostamento angolare** è definito come lo sfasamento tra tensioni concatenate di primario e secondario della stessa fase in senso orario (cioè in ritardo) ed è funzione del tipo di collegamento dell'avvolgimento AT e dell'avvolgimento bt.

Si definisce **gruppo** il numero ottenuto dividendo lo spostamento angolare per 30° ; i gruppi possibili sono numerati da 0 a 11:



Se, ad esempio, le due tensioni fossero sfasate di 90° , come mostrato in figura, il gruppo di collegamento di quel determinato trasformatore sarà dato da:

$$g. c. = \frac{90^\circ}{30^\circ} = 3$$

Solitamente, la maggior parte dei trasformatori configurati triangolo-stella appartengono al gruppo 11 e quindi troveremo sui dati di targa la sigla Dy11.

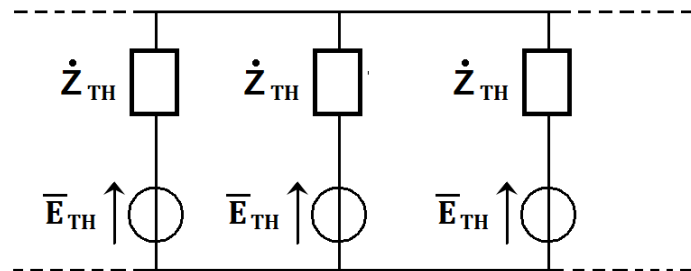
PRINCIPALI TIPI DI COLLEGAMENTO DEI TRASFORMATORI TRIFASE

A seconda del tipo di collegamento che contraddistingue il primario e il secondario e di come viene effettuato ci saranno diversi tipi di trasformatori trifase (caratterizzati anche da diversi valori di rapporti di trasformazione):

| Collegamento | | k_T | | | | | Spst. ang. | Gruppo | Denom. conv. |
|--------------|---------|----------------|----------|------------|----------|------------|------------|--------|--------------|
| prim. | sec. | | primario | secondario | primario | secondario | | | |
| stella | stella | k_N | | | | | 0° | 0 | Yy0 |
| | | | | | | | 180° | 6 | Yy6 |
| triang. | triang. | k_N | | | | | 0° | 0 | Dd0 |
| | | | | | | | 180° | 6 | Dd6 |
| triang. | stella | $k_N/\sqrt{3}$ | | | | | 330° | 11 | Dy11 |
| | | | | | | | 150° | 5 | Dy5 |
| stella | triang. | $k_N\sqrt{3}$ | | | | | 330° | 11 | Yd11 |
| | | | | | | | 150° | 5 | Yd5 |

TRASFORMATORI IN PARALLELO

Quando si verifica la necessità di trasferire grosse potenze da un circuito all'altro, può risultare conveniente ricorrere al **parallelo** fra due o più **trasformatori**. Dal punto di vista dello schema circuitale è come affiancare tante rappresentazioni di lati Thevenin, una per ciascun trasformatore:



Ovviamente la serie di paralleli Thevenin è riconducibile a un unico lato Thevenin in cui l'impedenza equivalente deriva dall'unione di tante impedenze in parallelo e cioè dalla somma di tante ammettenze.

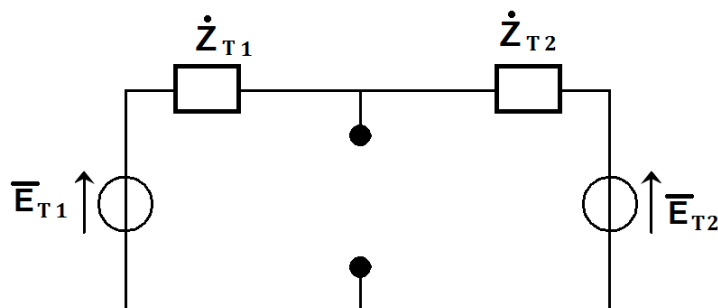
Come quando avevamo studiato i resistori in parallelo, anche con le impedenze in parallelo, se effettuiamo i calcoli che ci portano a un'unica impedenza equivalente, ci accorgiamo che questa è sempre più piccola man mano che aumentano le impedenze in parallelo, mentre, di contro, l'intensità della corrente aumenta sempre di più. Ciò vuol dire che non è saggio disporre molti trasformatori in parallelo altrimenti la corrente comincerebbe a dare problemi a livello di sicurezza.

Non necessariamente la potenza dei trasformatori in parallelo è uguale per tutti i dispositivi che li compongono, ma, al contrario, possiamo imporre potenze diverse. L'utilità è legata ai consumi dell'utenza: nelle ore dove la richiesta di energia è relativamente elevata possiamo lasciare in funzione solo i trasformatori che trasmettono potenze elevate, mentre nelle ore dove il fabbisogno non è particolarmente elevato possiamo tenere accesi solo quei trasformatori in grado di erogare potenze meno cospicue.

Ciò nonostante, affinché il parallelo tra due trasformatori funzioni correttamente, devono essere verificate alcune *condizioni sui dati di targa*.

VINCOLI DA RISPETTARE

Mettiamo caso di essere nell'ipotesi di carico equilibrato, quindi possiamo utilizzare il modello monofase equivalente per entrambi i trasformatori:



Tra i due morsetti, previsti dal modello monofase equivalente, andremo a collegare il carico.

N.B.: qualora il carico sia squilibrato è possibile riportarlo a un caso equilibrato attraverso il teorema di Fortesque.

CONDIZIONI A VUOTO

La prima condizione che dovremo far rispettare affinché il funzionamento sia ottimale è che in assenza di carico, cioè a vuoto, non ci sia corrente di circolazione nella maglia, ossia che non ci sia un trasformatore che veda l'altro come carico e viceversa perché altrimenti staremmo sprecando perdite joule (fermo restando che le perdite del ferro sono sempre presenti).

Se quindi applichiamo Kirchhoff alla maglia, imponendo la corrente che scorre nulla, troviamo la prima condizione:

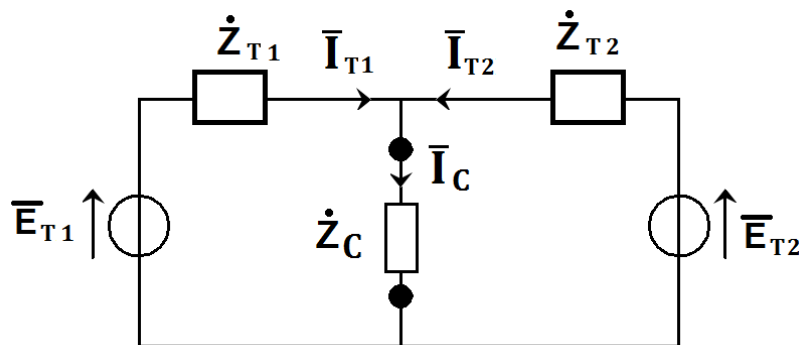
$$\bar{E}_{T1} - \bar{E}_{T2} = 0 \Rightarrow \bar{E}_{T1} = \bar{E}_{T2}$$

Per garantire questa condizione, ossia per ottenere uguali i due fasori, dobbiamo rispettare due vincoli: **stesso modulo** e **stessa fase**. Per avere due fasori con lo stesso modulo, essendo questi l'espressione di una trasformazione al secondario di una tensione primaria, dovremo imporre uno stesso rapporto di trasformazione k_T .

Nel caso di trasformatori trifase, questi devono avere lo *stesso gruppo di appartenenza*. Se i due trasformatori trifase, pur verificando la condizione descritta in precedenza, avessero diversi gruppi di appartenenza, sarebbe comunque presente, nel funzionamento a vuoto, una circolazione di corrente nei secondari dei trasformatori, dovuta alla differenza di potenziale indotta dallo sfasamento tra i fasori.

CONDIZIONI A CARICO

Collegiamo ai morsetti un carico a cui arriva una corrente frutto del contributo di entrambi i trasformatori:



Applicando il principio alle correnti di Kirchhoff al nodo otteniamo:

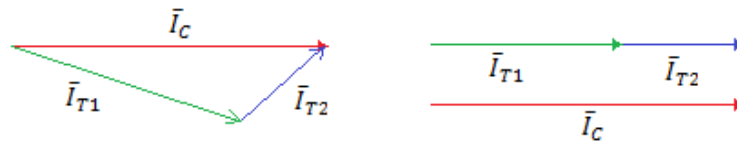
$$\bar{I}_C = \bar{I}_{T1} + \bar{I}_{T2}$$

Anche a carico dobbiamo imporre dei vincoli sia ai moduli che alle fasi dei fasori delle correnti.

Per quanto riguarda i moduli, se i due trasformatori hanno diverse potenze apparenti dobbiamo fare in modo che non si verifichi che quello con potenza minore vada in sovraccarico e quello con potenza maggiore vada in sottocarico. Bisogna fare in modo, quindi, che la potenza erogata si ripartisca tra i due trasformatori in maniera direttamente proporzionale alle rispettive potenze apparenti nominali; ossia che al trasformatore più potente competa la corrente e la potenza apparente più grande e a quello meno potente la corrente e la potenza apparente più basse. In simboli:

$$\frac{I_{T1}}{I_{T2}} = \frac{A_{n1}}{A_{n2}}$$

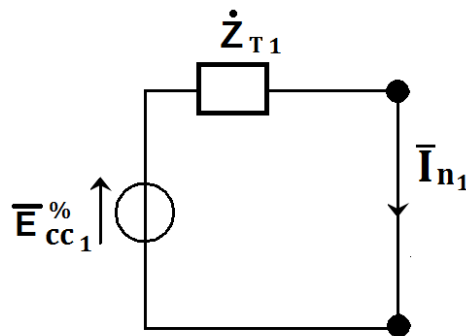
Per le fasi, invece, vi è la necessità che i fasori delle correnti siano in fase perché questa particolare disposizione garantisce *moduli minimi* per i fasori. A parità di modulo di \bar{I}_C , infatti, si ha che:



Inoltre, se le due correnti hanno la stessa fase, il loro rapporto restituisce un numero reale:

$$\frac{I_{T1} e^{j\beta_1}}{I_{T2} e^{j\beta_2}} \quad \text{se } \beta_1 = \beta_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{I_{T1}}{I_{T2}}$$

Per far rispettare i vincoli sulle tensioni e sulle correnti, dal punto di vista dei dati di targa, e quindi delle relative prove, occorre che i fasori di tensione nominale in cortocircuito siano uguali per tutti e due i trasformatori e che gli argomenti delle loro impedenze siano anch'essi uguali per garantire la stessa fase sia per le tensioni che per le correnti. Vediamo come fare partendo da una prova in cto-cto del trasformatore 1 (i cui risultati sono validi anche per il secondo trasformatore):



In base allo schema monofase equivalente riportato sopra possiamo scrivere delle relazioni tra la potenza nominale e le correnti nominali:

$$\bar{I}_{n1} = \frac{\bar{E}_{cc1}}{\bar{Z}_{T1}}$$

Se ripetiamo la stessa prova ma con il secondo trasformatore:

$$\bar{I}_{n2} = \frac{\bar{E}_{cc2}}{\bar{Z}_{T2}}$$

Solo se i moduli dei fasori di tensioni sono uguali otteniamo che il rapporto tra le correnti è uguale al rapporto tra le impedenze:

$$\text{se } \bar{E}_{cc1} = \bar{E}_{cc2} \quad \Rightarrow \quad \frac{\bar{I}_{n1}}{\bar{I}_{n2}} = \frac{\bar{Z}_{T2}}{\bar{Z}_{T1}}$$

Questo vuol dire che affinché le correnti si ripartiscano proporzionalmente alle rispettive correnti nominali è necessario che i due trasformatori abbiano la *stessa tensione di cortocircuito in percentuale*.

Analizziamo i moduli delle impedenze:

$$\dot{Z}_{T1} = Z_{T1} e^{j\varphi_{1cc}} \quad \dot{Z}_{T2} = Z_{T2} e^{j\varphi_{2cc}}$$

Affinché il rapporto tra le impedenze restituisca un numero reale le fasi devono risultare uguali:

$$\varphi_{1cc} = \varphi_{2cc}$$

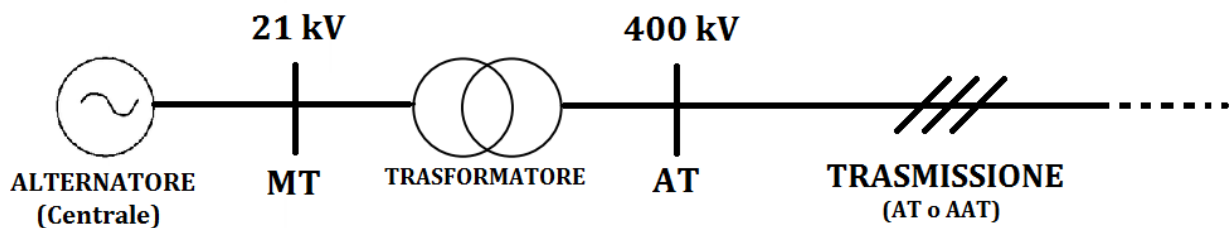
Esplicitando le fasi otteniamo che:

$$\arctan \frac{\dot{X}_{T1}}{R_{T1}} = \arctan \frac{\dot{X}_{T2}}{R_{T2}} \Rightarrow \frac{\dot{X}_{T1}}{R_{T1}} = \frac{\dot{X}_{T2}}{R_{T2}}$$

Quest'ultima condizione non pone un vero e proprio vincolo. È piuttosto una questione di *ottimizzazione dell'efficacia dei trasformatori*, cioè affinché funzionino al meglio delle loro possibilità.

SISTEMI DI PRODUZIONE, TRASMISSIONE E DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

Lo **schema unifilare** che rappresenta il sistema inizia con la **centrale elettrica** che produce energia elettrica e per questo è raffigurata tramite un **alternatore**:



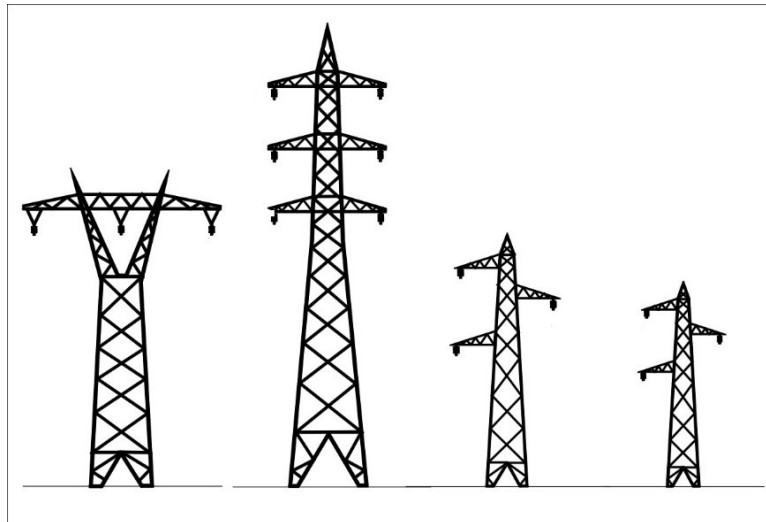
N.B.: L'alternatore è una macchina elettrica rotante basata sulla legge fisica dell'induzione elettromagnetica (o di Faraday), che converte l'energia meccanica fornita dal motore primo (che può essere innescato da un fluido o da vapore) in energia elettrica sotto forma di corrente alternata. Questo processo, denominato *conversione elettromeccanica dell'energia*, coinvolge la formazione di campi magnetici che agiscono come mezzo intermedio.

I tratti verticali indicano i punti dove sono collegati gli alternatori e si chiamano **sbarre**, o *quadri* se siamo in bassa tensione (in inglese "bus"). Gli alternatori producono in media 21 kV (media tensione) e dato che a questi livelli di tensione abbiamo correnti molto onerose che necessitano di conduttori con grandi sezioni per essere trasportate, si costruisce un trasformatore elevatore in grado di passare da 21 kV a 400 kV (alta tensione).

LA TRASMISSIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA: LE LINEE DELL'ALTA TENSIONE

A questo punto avviene la **trasmissione** tramite le **linee dell'alta tensione** della corrente. Le tre sbarre messe per obliquo indicano che il sistema adottato è il trifase (qualora fosse distribuito il neutro si aggiunge una mezza sbarra). I conduttori che formano le linee sono isolati in aria (conduttori "nudi") e non sono composti da rame puro ma da leghe metalliche, in cui a volte non è nemmeno presente il rame stesso (leghe di alluminio-acciaio), che garantiscono non solo una buona conducibilità elettrica ma anche una sufficiente tenuta meccanica necessaria a resistere agli stress meccanici a cui sono sottoposti i fili tesi sospesi in aria.

Le linee dell'alta tensione sono sospese da un **sostegno** all'altro (quelli che nell'immaginario collettivo sono detti **tralici**). I sostegni possono avere diverse forme:



Osserviamo la seguente immagine:



La prima cosa che possiamo notare è che pur essendo il sistema trifase, dal sostegno partono più di tre fili. Il perché è dovuto a esigenze di tenuta di carica: nei punti da dove partono i fili sono presenti degli isolatori che devono sostenere i carichi, e più i cavi sono pesanti più avrò bisogno di altri isolatori per equilibrare il peso totale. Per intenderci: se abbiamo due buste della spesa cariche sarà più agevole e meno faticoso portarle con due braccia invece che con uno solo. A seconda dei fili che si dipartono da ogni braccio del sostegno possiamo distinguere: **fasci binati** (due fili da ogni braccio), **trinati** (tre fili) o **quadrinati** (quattro fili).

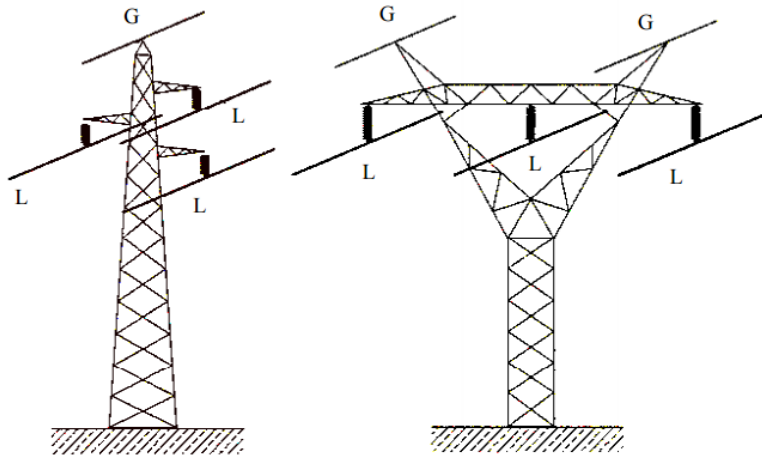
L'EFFETTO CORONA

Un altro motivo per il quale sono adottati più fili è legato alla loro funzione di contenimento dei campi elettrici mirata a ridurre il pericoloso fenomeno dell'**effetto corona** dovuto alla ionizzazione dell'aria che a contatto con i fili, se il campo elettrico è molto forte, arriva a comportarsi come ulteriore conduttore unendo il proprio contributo alla trasmissione creando archi elettrici o perdite non desiderate. La presenza dell'effetto Corona è spesso visibile come una fascia luminescente di colore azzurrino che riveste i conduttori, ma comporta anche conseguenze udibili perché specie nelle giornate umide, è possibile sentire in prossimità degli elettrodotti ad alta tensione un ronzio, o crepitio, dovuto proprio alla ionizzazione dell'aria. Per ridurre l'effetto corona degli studi sperimentali hanno dimostrato che più aumentiamo i

conduttori del fascio e più i moduli dei campi elettrici generati da ciascun conduttore si riducono contenendo il campo totale e mitigando l'effetto corona.

LE FUNI DI GUARDIA

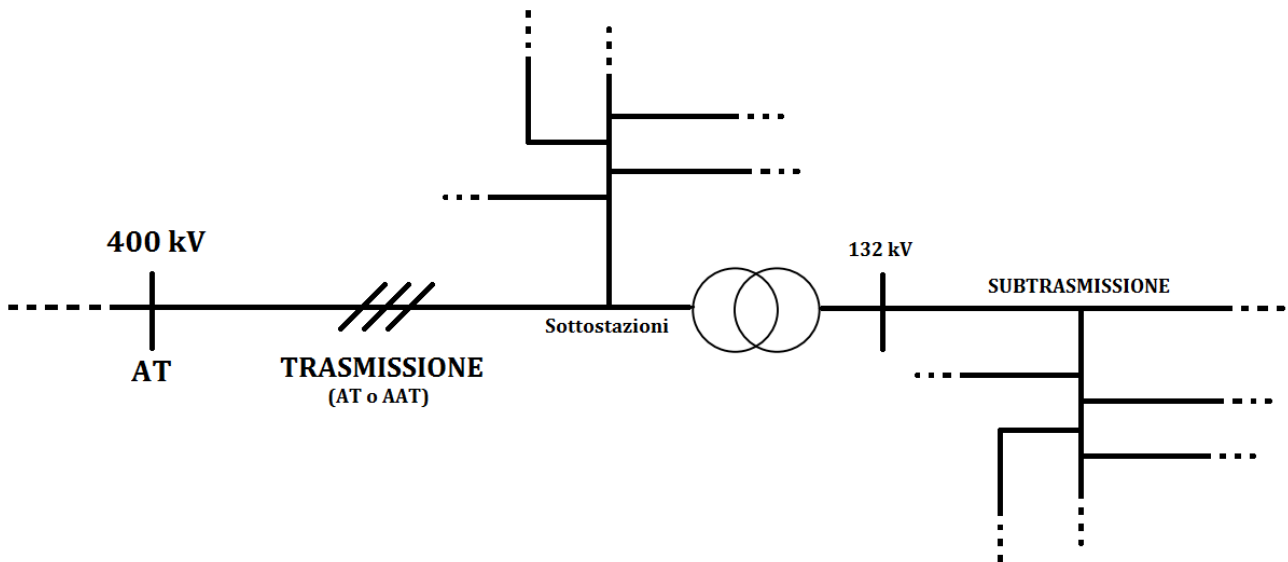
Le linee ad alta tensione prevedono la presenza di uno o più conduttori supplementari (indicati con G nella figura sotto), denominati **funi di guardia**, generalmente poste in cima al sostegno. Questi conduttori fungono da *parafulmini*, cioè la loro funzione è quella di costituire una schermatura protettiva dei cavi sottostanti (indicati con L nella figura) nei confronti di eventuali fulminazioni dirette dovute a sovratensioni atmosferiche.



LE SOTTOSTAZIONI E LA SUBTRASMISSIONE

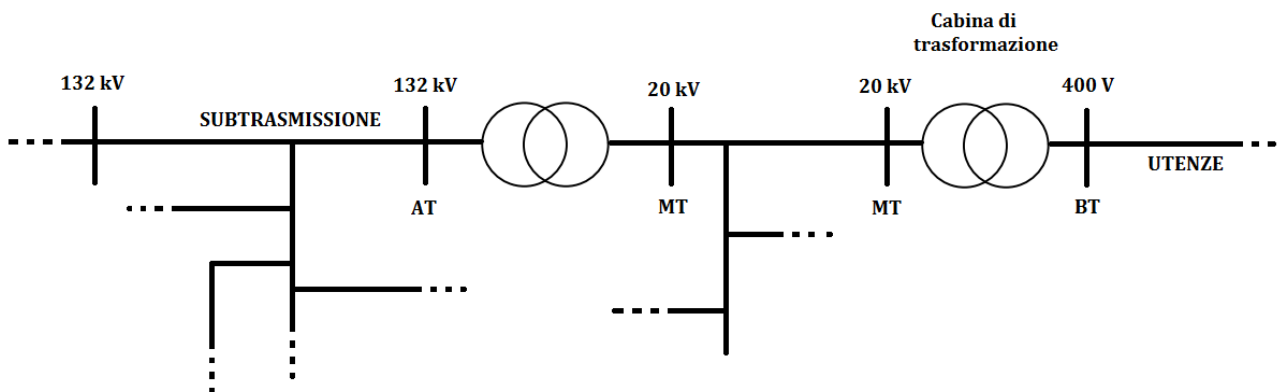
Durante il percorso delle linee di trasmissione ci saranno dei punti di raccolta, che prendono il nome di **sottostazioni**, da dove l'energia viene smistata nel territorio. Nelle sottostazioni sono presenti anche dei trasformatori che servono a replicare il più possibile gli effetti produttivi della centrale, perché durante il tragitto la linea elettrica può subire innalzamenti o abbassamenti di tensione che questi trasformatori elevatori o abbassatori, a seconda dei casi, correggono ripristinando la tensione iniziale.

Laddove le linee che partono dalle sottostazioni giungono in regioni dove la richiesta di potenza è minore necessitiamo di correnti con tensione più bassa (dell'ordine dei 132 kV) e quindi vengono costruiti dei trasformatori abbassatori e la trasmissione prende il nome di **subtrasmissione**:



DALLA SUBTRASMISSIONE ALLE UTENZE

Dalla subtrasmissione si arriva nei punti in cui avviene la distribuzione in media tensione dove sono posizionati dei trasformatori che portano la tensione da alta (132 kV) a media (20 kV) e inizia la **trasmissione a media tensione** la quale si interromperà con un nuovo trasformatore che non si chiamerà più sottostazione, ma **cabina di trasformazione** dove la tensione viene nuovamente abbassata fino a 400 V per l'uso degli utenti:



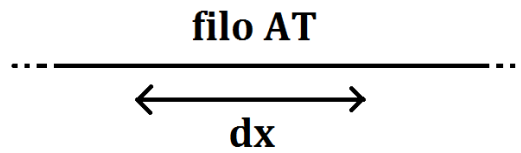
IL MODELLO A PARAMETRI DISTRIBUITI: LE LINEE LUNGHE

Già in una delle prime lezioni avevamo visto che a seconda della lunghezza del circuito e della lunghezza d'onda che intendiamo trasmettere varia il modello circuitale a cui dobbiamo fare riferimento. In particolare avevamo scoperto che il modello circuitale a parametri concentrati era valido fintantoché la lunghezza d'onda elettromagnetica era molto maggiore della massima lunghezza dell'impianto da modellare:

$$\lambda \gg L$$

Le **linee di trasmissione lunghe** hanno lunghezze dell'ordine di migliaia di km e le lunghezze d'onda a frequenza 50 Hz arrivano a valori di 6000 Km: i due valori sono dunque confrontabili e quindi non è possibile usare un approccio circuitale e tutte le approssimazioni che ne conseguivano (dimensioni del circuito nulle, tempi di propagazione nulli e velocità infinite...).

Per risolvere il problema consideriamo solo un tratto infinitesimo del cavo di linea dove possiamo dire che $\lambda \gg L$:



Il modello circuitale di questo tratto di filo sarà composto da **parametri longitudinali**, che compaiono perché c'è una corrente che scorre nel filo, e **trasversali**, che vengono introdotti perché c'è una tensione tra il filo e l'ambiente (tutti moltiplicati per l'unità di lunghezza dx).

PARAMETRI LONGITUDINALI

Uno dei parametri longitudinali che andremo a inserire, vista la natura conduttrice del filo, sarà un resistore con resistenza $r dx$ dove $r = \frac{\rho}{S}$.

La corrente che attraversa il filo genera un campo magnetico. Il problema è che anche gli altri due fili che formano il sistema trifase generano il loro campo magnetico e quindi nel modello dovremo inserire un parametro che tenga conto sia dell'autoinduttanza del filo in esame che delle mutue induttanze dovute agli altri due fili. È possibile dimostrare che, in virtù dell'ipotesi di simmetria delle correnti, possiamo assegnare a un induttore un'induttanza equivalente l che tiene conto di tutte e tre i campi magnetici e che prende il nome di **induttanza di servizio**.

L'induttanza di servizio darà luogo a una reattanza x pari a:

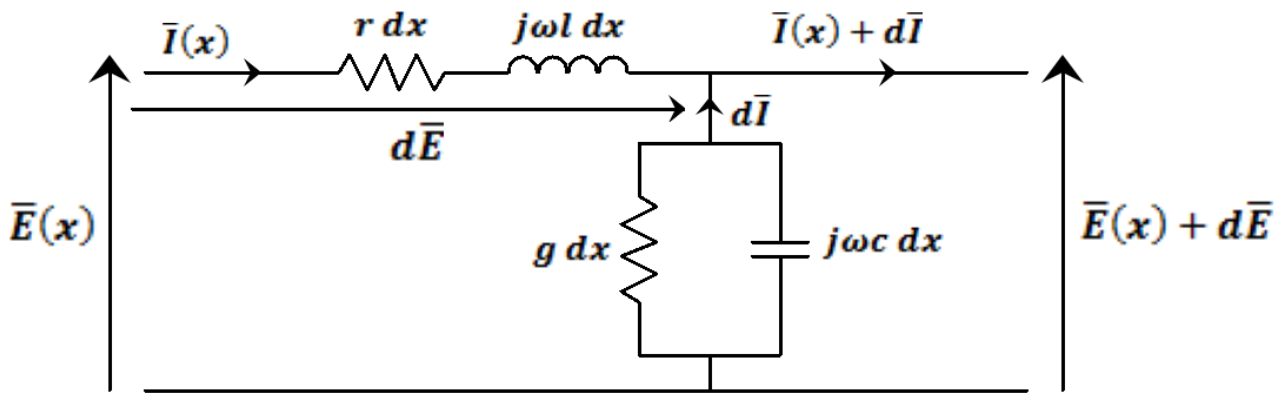
$$x = \omega l$$

PARAMETRI TRASVERSALI

A questo punto dobbiamo mettere in conto anche gli effetti dovuti alla tensione, la quale crea una distribuzione di potenziale per cui se in mezzo abbiamo un materiale conduttore si creano delle correnti di conduzione dovute proprio a cariche che si spostano dalla linea all'ambiente. L'ambiente dal punto di vista del modello circuitale può essere rappresentato da un carico statisticamente equilibrato formato da un resistore di conduttanza g e da un condensatore messi in parallelo. Il motivo per il quale inseriamo un condensatore sta nel fatto che della corrente fuoriesce dal conduttore e quindi quest'ultimo agisce rispetto all'ambiente e rispetto agli altri conduttori come se fosse un condensatore collegato tra la linea e l'ambiente. La capacità del condensatore, che denominiamo **capacità di servizio**, terrà conto non solo delle correnti di spostamento che migrano agli altri fili, ma anche di quelle che vanno alle funi di guardia e a terra. Tale capacità darà luogo a un'ammettenza:

$$y = \omega c$$

Lo schema finale che si ripeterà per tutta la linea dando luogo alla cosiddetta **cascata di biporte** (o di *quadripoli*) sarà il seguente:



Calcoliamo la tensione $d\bar{E}$ in convenzione dei generatori:

$$d\bar{E} = -(r + j\omega l) dx \bar{I}$$

Se andiamo ad effettuare il calcolo di $\bar{E}(x) + d\bar{E}$ trascureremo il secondo termine perché a un valore finito (per esempio in AT avrei $400/\sqrt{3}=230$ V) sommo un valore infinitesimo. Quindi nel calcolo di $d\bar{I}$ considereremo solo $\bar{E}(x)$:

$$d\bar{I} = -(g + j\omega c) dx \bar{E}$$

Dalle due espressioni individuate si ricavano le **equazioni dei telegrafisti**:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{E}}{dx} &= -(r + j\omega l) \bar{I} &\Rightarrow &\frac{d\bar{E}}{dx} = -z \bar{I} \\ \frac{d\bar{I}}{dx} &= -(g + j\omega c) \bar{E} &\Rightarrow &\frac{d\bar{I}}{dx} = -y \bar{E} \end{aligned}$$

Le due leggi sono duali: isoliamo la corrente o la tensione in una delle due e la inseriamo nell'altra (dividendo prima per dx a entrambi i membri) ...

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \bar{E}}{dx^2} &= z y \bar{E} \\ \frac{d^2 \bar{I}}{dx^2} &= z y \bar{I} \end{aligned}$$

Dalle soluzioni delle equazioni dei telegrafisti è possibile risalire alle equazioni d'onda...

la soluzione omogenea prevede che:

$$\alpha^2 = zy \quad \Rightarrow \quad \alpha_{1,2} = \pm \sqrt{zy} = \pm k$$

Dove k prende il nome di **costante complessa di propagazione** in quanto l'integrale sarà solo quello derivante dalle soluzioni omogenee. La soluzione dell'integrale omogeneo, che corrisponderà con l'**equazione d'onda della tensione**, sarà quindi:

$$\bar{E}(x) = \bar{A}_1 e^{kx} + \bar{A}_2 e^{-kx}$$

$\bar{A}_1, \bar{A}_2 =$ **costanti di integrazione**

Sfruttando il legame:

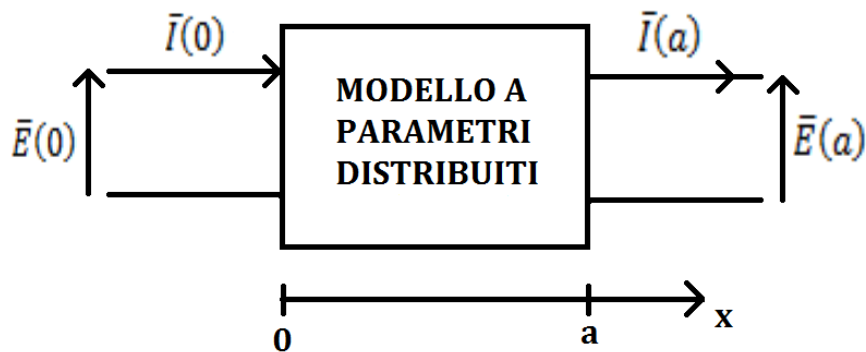
$$\frac{d\bar{E}(x)}{dx} = -z \bar{I}(x)$$

Ricaviamo l'equazione d'onda della corrente:

$$\bar{I}(x) = -\frac{1}{z} \bar{A}_1 k e^{kx} + \frac{1}{z} \bar{A}_2 e^{-kx}$$

Immaginiamo quindi di voler studiare la linea di trasmissione di lunghezza finita a che va da una centrale a una sottostazione e di cui conosco i valori di tutti i parametri distribuiti...

Alla luce di quanto imparato possiamo rappresentare la linea con un unico biporte in cui distinguo uno stato iniziale di partenza (0) e uno stato finale di arrivo (a):



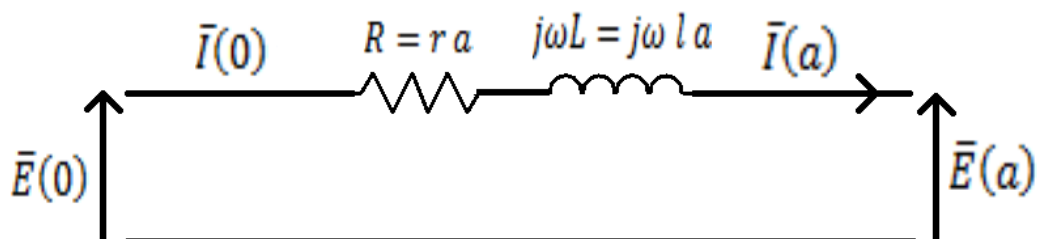
Imponiamo le equazioni di Cauchy:

$$\begin{aligned} \bar{E}(0) &= \bar{A}_1 + \bar{A}_2 \\ \bar{I}(0) &= -\frac{1}{z} \bar{A}_1 + \frac{1}{z} \bar{A}_2 \end{aligned}$$

Da queste equazioni possiamo ricavarci i valori di \bar{A}_1 e \bar{A}_2 e una volta inserito nelle rispettive funzioni d'onda al posto della x il valore a siamo in grado di calcolarci le tensioni e le correnti d'arrivo.

LE LINEE CORTE

Se le linee sono in bassa tensione, siccome non possono permettersi di trasportare potenze troppo elevate, i carichi collegati localmente saranno piccoli e la lunghezza degli impianti sarà dell'ordine delle poche centinaia di metri, lunghezza che non è più tanto vicina ai 6000 km della lunghezza d'onda e quindi le correnti di spostamento, con i loro relativi effetti, possono essere trascurate permettendo l'eliminazione dei parametri trasversali dal modello. Quindi tra partenza e arrivo avremo solo un'impedenza:



Tale schema è tipico delle linee corte.

DIMENSIONAMENTO DI UN IMPIANTO

Dal punto di vista progettuale per arrivare a determinare la corrente presunta d'impianto I_B partiamo dall'individuazione della **potenza installata** di ogni i-esimo carico che può essere ricavata dalla conoscenza di P_i e Q_i (in alcuni casi al posto della potenza reattiva viene fornito il valore del fattore di potenza $\cos \varphi$).

Altri dati che vengono coinvolti sono i cosiddetti **coefficienti di utilizzazione** k_U , di **contemporaneità** k_C ai quali viene aggiunta l'informazione sul rendimento η in caso di presenza di motori.

N.B: il fattore di utilizzazione k_U indica la parte di potenza installata che viene effettivamente utilizzata; il fattore di contemporaneità k_C indica in che percentuale quelle determinate unità vengono utilizzate contemporaneamente.

La potenza installata è data dalla seguente espressione, da cui sarà possibile poi ricavare la corrente del carico:

$$P_{uk} = \frac{P_i \cdot k_C \cdot k_U}{\eta} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_B \cdot \cos \varphi$$

Se le utenze sono più di una avremo che:

$$P_{tot} = \sum_{k=1}^{n_u} P_{uk}$$

ESEMPIO APPLICATIVO

Vengono di seguito elencate per ogni carico: le potenze installate, il numero di apparecchiature, il fattore di utilizzazione, il fattore di contemporaneità, il rendimento e il fattore di potenza.

| CARICHI | P_i [Kw] | N° | k_U | k_C | η | $\cos \varphi$ | P | Q |
|---------|------------|------|-------|-------|--------|----------------|--------|-------|
| 1 | 2,4 | 5 | 1 | 0,7 | 0,8 | 0,75 | 10,50 | 9,26 |
| 2 | 4,5 | 3 | 1 | 0,7 | 0,82 | 0,8 | 11,52 | 8,64 |
| 3 | 10 | 1 | 0,8 | 1 | 0,91 | 0,85 | 8,79 | 5,45 |
| 4 | 0,01 | 2000 | / | / | / | 0,8 | 20,00 | 15,00 |
| 5 | 0,08 | 2000 | / | / | / | 0,9 | 160,00 | 77,49 |

Calcoliamo le singole **potenze attive** e **reattive** per ogni carico (il procedimento è illustrato solo per il primo carico):

$$P_1 = N^\circ \cdot P_i \cdot k_U \cdot k_C \cdot \eta = \frac{5 \cdot 2,4 \cdot 1 \cdot 0,7}{0,8} = 10,5$$

$$\varphi_1 = \arccos(0,75) = 0,723$$

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan(\varphi_1) = 9,26$$

Sommando i risultati ottenuti otteniamo la potenza installata attiva e reattiva globale grazie alle quali siamo in grado di trovare il **cos φ** convenzionale dell'impianto:

$$P_B = 10,50 + 11,52 + 8,79 + 20,00 + 160,00 = 210,81$$

$$Q_B = 9,26 + 8,64 + 5,45 + 15,00 + 77,49 = 115,84$$

$$\tan(\varphi) = \frac{Q_B}{P_B} = 0,549 \Rightarrow \varphi = \arctan(0,549) = 0,502 \Rightarrow \cos \varphi = 0,88$$

Quando rifasare?

- quando il fattore di potenza medio è inferiore a 0,7 l'utente è **obbligato** a rifasare l'impianto
- quando il fattore di potenza medio è compreso tra 0,7 e 0,95 *non c'è l'obbligo* di rifasare l'impianto ma l'utente **paga** una penale per l'energia reattiva
- quando il fattore di potenza medio è superiore a 0,95 ed inferiore ad 1 *non c'è l'obbligo* di rifasare l'impianto e *non si paga* nessuna quota d'energia reattiva.

L'utente è quindi sollecitato a rifasare almeno fino ad un fattore di potenza = 0,95.

Un altro modo per calcolare la corrente I_B è:

$$I_B = \frac{\sqrt{P_B^2 + Q_B^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

Una volta individuata I_B si procede al dimensionamento dell'impianto che tiene conto di due fattori: la portata I_Z e la caduta di tensione massima ammissibile scelta dal progettista (massimo 10%). È importante che la portata sia maggiore della corrente d'impianto presunta affinché i cavi la possano sopportare:

$$I_Z > I_B$$

Esistono delle tabelle in cui in corrispondenza di una sezione e del tipo di posa del cavo ci viene fornito il valore della portata I_Z . Quindi, una volta ricavato I_B , si decide un valore di portata, quantizzato in base ai valori delle portate tabellate (si sceglie il valore subito superiore), si annota a quale sezione del cavo corrisponde e si controlla se la portata associata a quella sezione sia compatibile con il tipo di posa. Se non risulta compatibile dobbiamo correggere la portata che si deprezza per due fattori: il **tipo di posa** e la **temperatura ambiente**. Se, infatti la temperatura ambiente è al di sotto dei 30°C non si deprezza la portata, ma qualora superasse i 30°C si moltiplica I_Z per due **coefficienti riduttivi**: uno dovuto alla temperatura >30°C e l'altro dipendente dal tipo di posa (in aria per esempio non abbiamo alcun coefficiente mentre se interrato il cavo scambia meno con l'ambiente e quindi la portata diminuisce):

$$I_Z \equiv I_Z \quad \text{con } T < 30^\circ\text{C}$$

$$I_Z = I_Z \cdot k_1 \cdot k_2 \quad \text{con } T > 30^\circ\text{C}$$

Trovata la sezione S , vengono forniti i valori delle r e delle x chilometriche che compaiono nella formula delle cadute di tensione:

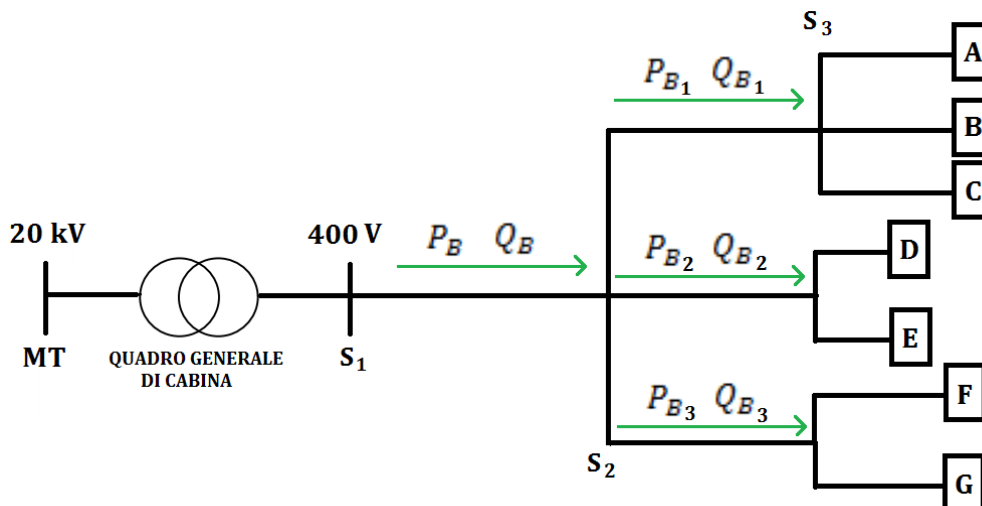
$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_Z ((r \cdot L) \cos \varphi + (x \cdot L) \sin \varphi)$$

Tabella valori caduta di tensione unitaria in mV/Am e valori di resistenza e reattanza chilometriche per cavi BT

| S = Sezione nominale | Cavi unipolari | | | | | | Cavi bipolari | | | | Cavi tripolari | | | | S = Sezione nominale | | |
|----------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|-------------------|-------------------------------------|----------------------------|--|-------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| | Resistenza r ad 80°C (chilometrica) | Reattanza x (chilometrica) | Caduta di tensione unitaria Δu | | | | Resistenza r ad 80°C (chilometrica) | Reattanza x (chilometrica) | Caduta di tensione unitaria Δu | | Resistenza r ad 80°C (chilometrica) | Reattanza x (chilometrica) | Caduta di tensione unitaria Δu | | | | |
| | | | Corrente alternata | | | | | | Corrente alternata monofase | | | | Corrente alternata monofase | | | | |
| | | | monofase | | trifase | | | | cos φ 1 | cos φ 0,8 | | | cos φ 1 | cos φ 0,8 | | cos φ 1 | cos φ 0,8 |
| | | | cos φ 1 | cos φ 0,8 | cos φ 1 | cos φ 0,8 | | | | | | | | | | | |
| mmq | Ω/km | Ω/km | mV/Am | mV/Am | mV/Am | mV/Am | Ω/km | Ω/km | mV/Am | mV/Am | Ω/km | Ω/km | mV/Am | mV/Am | mmq | | |
| 1 | 22,1 | 0,176 | 44,2 | 35,6 | 38,3 | 30,8 | 22,5 | 0,125 | 45,0 | 36,1 | 22,5 | 0,125 | 39,0 | 31,3 | 1 | | |
| 1,5 | 14,8 | 0,168 | 29,7 | 23,9 | 25,7 | 20,7 | 15,1 | 0,118 | 30,2 | 24,3 | 15,1 | 0,118 | 26,1 | 21,0 | 1,5 | | |
| 2,5 | 8,91 | 0,155 | 17,8 | 14,4 | 15,4 | 12,5 | 9,08 | 0,109 | 18,2 | 14,7 | 9,08 | 0,109 | 15,7 | 12,7 | 2,5 | | |
| 4 | 5,57 | 0,143 | 11,1 | 9,08 | 9,65 | 7,87 | 5,68 | 0,101 | 11,4 | 9,21 | 5,68 | 0,101 | 9,85 | 7,98 | 4 | | |
| 6 | 3,71 | 0,135 | 7,41 | 6,10 | 6,42 | 5,28 | 3,78 | 0,0955 | 7,56 | 6,16 | 3,78 | 0,0955 | 6,54 | 5,34 | 6 | | |
| 10 | 2,24 | 0,119 | 4,47 | 3,72 | 3,87 | 3,22 | 2,27 | 0,0861 | 4,55 | 3,73 | 2,27 | 0,0861 | 3,94 | 3,24 | 10 | | |
| 16 | 1,41 | 0,112 | 2,82 | 2,39 | 2,44 | 2,07 | 1,43 | 0,0817 | 2,87 | 2,39 | 1,43 | 0,0817 | 2,48 | 2,07 | 16 | | |
| 25 | 0,889 | 0,106 | 1,78 | 1,55 | 1,54 | 1,34 | 0,907 | 0,0813 | 1,81 | 1,55 | 0,907 | 0,0813 | 1,57 | 1,34 | 25 | | |
| 35 | 0,641 | 0,101 | 1,28 | 1,15 | 1,11 | 0,993 | 0,654 | 0,0783 | 1,31 | 1,14 | 0,654 | 0,0783 | 1,13 | 0,988 | 35 | | |
| 50 | 0,473 | 0,101 | 0,947 | 0,878 | 0,820 | 0,760 | 0,483 | 0,0779 | 0,967 | 0,866 | 0,483 | 0,0779 | 0,838 | 0,750 | 50 | | |
| 70 | 0,328 | 0,0965 | 0,656 | 0,641 | 0,568 | 0,555 | 0,334 | 0,0751 | 0,699 | 0,624 | 0,334 | 0,0751 | 0,579 | 0,541 | 70 | | |

Confrontiamo la caduta di tensione calcolata con quella che ci eravamo prefissati e, se il valore non dovesse soddisfare le richieste, per rimediare possiamo aumentare la sezione **S** che porta a una riduzione sia del valore **r** che del valore **x**; quest'ultimo tuttavia se osserviamo bene in tabella non diminuisce di molto al variare di **S**.

Il dimensionamento che abbiamo effettuato finora è valido però per un singolo cavo, cioè per quello che dal trasformatore arriva al primo quadro generale dal quale però si ramificano più cavi. Osserviamo il seguente **schema radiale**:



Dopo il primo cavo (progettato con una determinata sezione) che si diparte dalla sbarra **S₁** e trasporta la potenza totale attiva **P_B** e reattiva **Q_B**, può capitare che le potenze totali si dividano in tre tratte ciascuna delle quali può avere a sua volta una propria ulteriore ramificazione. Ogni tratta viene singolarmente dimensionata con l'obiettivo di arrivare ad avere una caduta di tensione ΔV il più piccola possibile ai capi

del carico finale (A, B, C...). Tale caduta di tensione è ottenuta sommando tutte le cadute di tensione coinvolte nel percorso che arriva al carico di riferimento. Per esempio, per il carico A si avrà:

$$\Delta V_A \% = \Delta V_T \% + \Delta V_{S1-2} \% + \Delta V_{S2-3} \% + \Delta V_{U_A} \%$$

$\Delta V_T \% =$ caduta di tensione sul trasformatore (risente dell'intero schema)

$\Delta V_{S1-2} \% =$ caduta di tensione dalla sbarra S1 alla sbarra S2

$\Delta V_{S2-3} \% =$ caduta di tensione dalla sbarra S2 alla sbarra S3

$\Delta V_{U_A} \% =$ caduta di tensione dell'utenza A

In $\Delta V_T \%$ e $\Delta V_{S1-2} \%$ confluiscono le potenze attive e reattive totali P_B e Q_B , mentre nella $\Delta V_{S2-3} \%$ sono presenti P_{B1} e Q_{B1} fino alla sbarra S3. In $\Delta V_{U_A} \%$ terremo conto, invece, solo della P_{BA} e Q_{BA} . Per calcolare ogni caduta di tensione la formula a cui si fa riferimento è:

$$\Delta V \% = \frac{RP + XQ}{V_n^2} \cdot 100$$

La scelta delle parti con cui suddividere le potenze è a discrezione del progettista a patto che ogni caduta di tensione finale non sia superiore al 10%.

Inoltre con l'aumentare delle ramificazioni anche la corrente subisce delle diminuzioni di intensità via via che viene incanalata nelle diverse tratte e perciò avremo sezioni sempre più piccole man mano che ci allontaniamo dal quadro generale.

Una volta terminato il dimensionamento delle componenti dell'impianto passiamo alle **protezioni** dalle **sovracorrenti** e **sovratensioni**. Le sovracorrenti sono tutti quei valori di corrente che superano la portata del cavo, mentre le sovratensioni sono tutti quei valori di tensione che superano la tensione nominale.

L'ultima parte del dimensionamento dell'impianto riguarda la sicurezza elettrica che ha il compito di analizzare, studiare e prevenire tutti quei fenomeni pericolosi per gli utenti che usufruiscono dell'impianto.

LA MESSA A TERRA

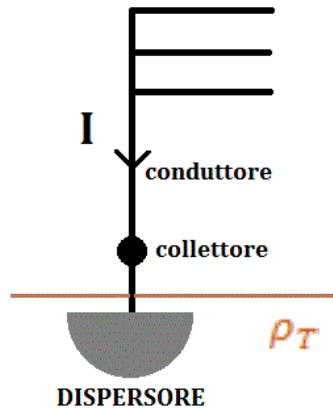
Prima però di trattare le protezioni e la sicurezza è necessario affrontare l'argomento della **messa a terra** partendo dallo studio dello **stato del neutro**, cioè come viene collegato all'ambiente.

Partiamo dall'osservare che è impossibile stabilire in modo univoco qual è la differenza di potenziale tra tutti gli "attori" del sistema elettrico, che sono le fasi attive (tra cui anche il neutro), e l'ambiente. Per poter essere sicuri di avere un valore fissato, e non aleatorio, del potenziale verso l'ambiente, generalmente il neutro (e quindi il centro stella del secondario) viene collegato a quello che in gergo tecnico si dice potenziale di terra. Lo stato del neutro può essere collegato rispetto all'ambiente in due modi: **isolato** oppure **messo a terra**.

Il terreno è costituito da un mezzo che possiede una certa resistività, ossia il terreno non è un mezzo isolante ma si comporta da conduttore (buono o cattivo che sia). A tale resistività non possiamo attribuire un valore univoco perché essa dipende da molti fattori varianti nel tempo come il grado di salinità (la presenza di sali nel terreno permette la ionizzazione e quindi la conduzione), la presenza di rocce, il grado di umidità. Tuttavia esistono tabelle che forniscono valori che tengono conto di tutte le variabili elencate.

Immaginiamo di far uscire dal centro stella un conduttore, portarlo in un punto detto *collettore* (dove vengono fatti i vari collegamenti degli altri conduttori) e di costruire un contatto tra il centro stella e il

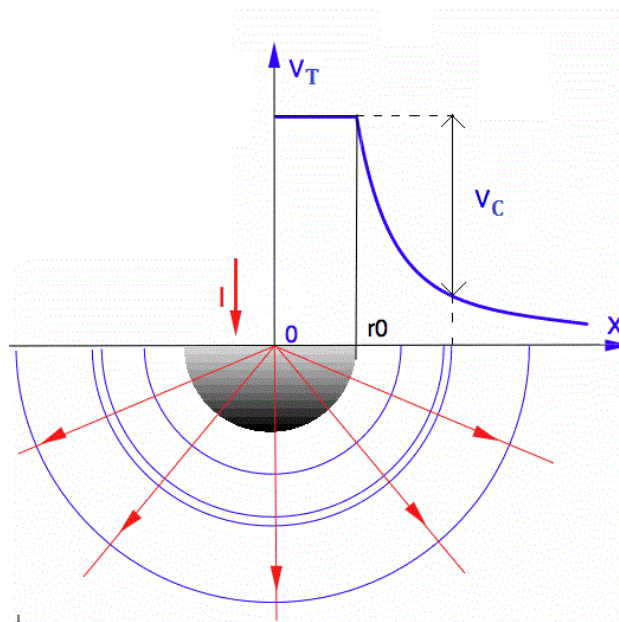
terreno tramite un oggetto metallico di forma semisferica che denomineremo **dispersore** (è come collegare tra loro due resistenze):



Attraverso misurazioni è possibile notare che la differenza di potenziale degli strati di terreno in prossimità del dispersore rispetto agli altri strati di terreno più lontani è molto bassa, anzi, prossima allo zero. Quindi se colleghiamo il neutro alla terra la d.d.p. è zero; parimenti se colleghiamo il cavo di fase al neutro e quindi alla terra i 230 V di tensione che avevamo nel circuito li ritroviamo anche con l'ambiente.

RESISTENZA DI TERRA

Concentriamoci ora sulla resistenza a terra, definita, come tutte le resistenze, dal rapporto tra una tensione e una corrente. Immaginiamo quindi di iniettare una corrente verso il dispersore e che per ipotesi la resistività del terreno sia omogenea:



La corrente va tradotta in termini di densità di corrente perché non è più un flusso contenuto in un cavo ma un campo elettrico radiale che si disperde nel mezzo terra (vedi figura):

$$\vec{J}(x) = \frac{I}{2\pi x^2} \vec{x} = \text{densità di corrente}$$

$$\vec{E}(x) = \rho_T \cdot \vec{J}(x) = \text{campo elettrico}$$

La differenza di potenziale sarà:

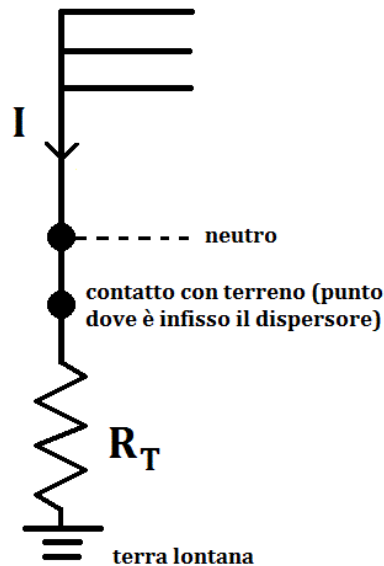
$$V_T = - \int_{r_0}^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{x} = - \int_{r_0}^{\infty} \frac{I}{2\pi x^2} \cdot dx = \frac{I \cdot \rho_T}{2\pi r_0}$$

Da cui è possibile ricavare il valore della **resistenza di terra**:

$$R_T = \frac{V_T}{I}$$

Si dice resistenza di terra R_T la somma delle resistenze elettriche elementari delle porzioni di terreno. Ad una certa distanza dal dispersore la sezione diventa così grande che la resistenza è pressoché nulla mentre nelle immediate vicinanze le sezioni attraverso le quali fluisce la corrente si rimpiccioliscono e la resistenza aumenta.

Lo schema elettrico che ne risulta sarà:

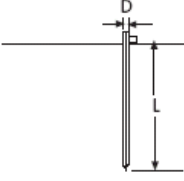
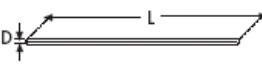
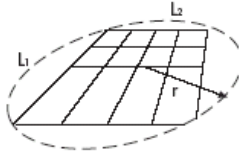


L'aver effettuato la messa a terra, tuttavia, non vuol dire aver evitato pericoli perché, come mostra il grafico dell'andamento del potenziale di terra, man mano che ci allontaniamo dal dispersore la d.d.p. si fa più forte e quindi un eventuale corrente che si disperde a terra avrà effetti pericolosi rilevanti per l'uomo che si trova in contatto elettrico (diretto o indiretto che sia) appena al di fuori del dispersore perché la tensione di contatto V_C è alta.

Possiamo dedurre che gli strati di terreno in prossimità del dispersore sono quelli che se hanno cattiva resistività peggiorano la situazione. Infatti in alcuni casi, per esempio quando si hanno terreni rocciosi, si effettuano degli scavi e si sostituisce il terreno roccioso con del terreno con maggior resistività.

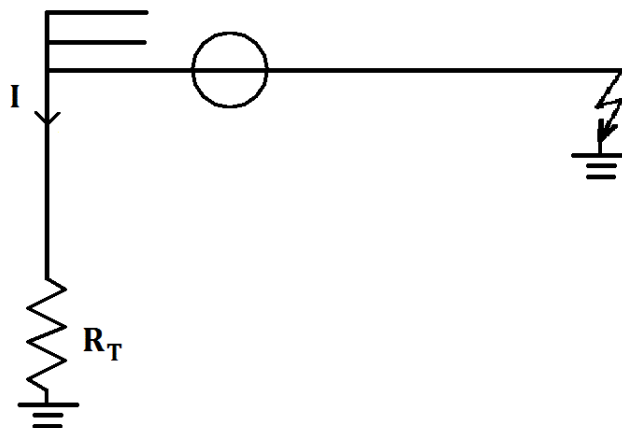
TIPI DI DISPERSORI

Anche se l'abbiamo utilizzata per capire il fenomeno, la geometria semisferica non si usa mai per costruire il dispersore perché il costo di realizzazione sarebbe troppo elevato dal momento che se adottiamo resistenze di terra basse (es: 1 OHM) con terreni con elevata resistività (es: 100 OHM per metro) il raggio che risulta dal calcolo sarebbe molto elevato (circa 50 metri). I tipi di dispersori generalmente più usati a seconda delle evenienze sono i seguenti:

| | PICCHETTI | CORDE | MAGLIA |
|----------------------------------|---|---|---|
| TIPO |  |  |  |
| FORMULA APPROSSIMATA PER ECCESSO | $R_E = 0,8 \frac{\rho}{L}$ vale per L/D compreso tra 30+40 | $R_E \cong 2 \frac{\rho}{L}$ vale per L/D compreso tra 5+30 | $R_E \cong 0,8 \frac{\rho}{L_1+L_2}$ |
| USO TIPICO | terreni di ridotte dimensioni con bassa resistività negli strati profondi | terreni estesi in lunghezza con bassa resistività negli strati superficiali | terreni di ridotte dimensioni (specialmente per cabine MT / BT) |

IL GUASTO A TERRA

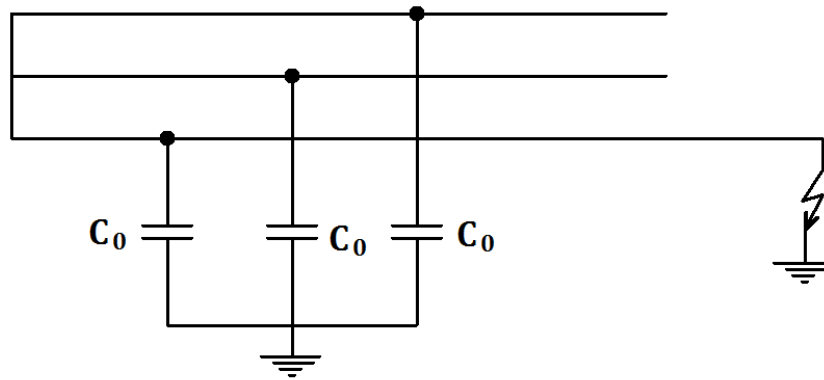
Il **guasto a terra** è il motivo che causa la presenza di una corrente che circola nel terreno: se, infatti, una fase che trasporta una determinata corrente dovesse toccare delle parti che sono a contatto col terreno (compreso il nostro corpo) si crea un circuito in cui la corrente raggiunge la resistenza di terra:



IL NEUTRO ISOLATO E LE CAPACITÀ PARASSITE

Qualora il neutro fosse **isolato**, cioè non collegato alla terra, in caso di guasto a terra, il circuito si chiude lo stesso a causa delle cosiddette **capacità parassite**, cioè delle capacità verso terra che non abbiamo montato noi ma dipendono dalla natura. Se a queste aggiungiamo le capacità tra fase e fase possiamo ricavare la **capacità di servizio** che già avevamo visto nel modello a parametri distribuiti.

Le capacità parassite sono di fatto dei contatti esistenti, ma invisibili, delle fasi con il terreno e quindi, qualora una delle fasi facesse accidentalmente contatto con la terra, creerebbe una corrente che si richiude con le altre correnti delle altre due fasi per **accoppiamento capacitivo**:



Le capacità crescono al crescere delle dimensioni dell'impianto: più questi è esteso, più le C_0 sono elevate e più le suscettanze che ne derivano possono essere trascurate. Se, per esempio, progettiamo un trasformatore di potenza per tutto un sistema allora possiamo trascurare gli effetti delle capacità parassite perché le correnti che arrivano ai carichi sono molto più grandi di quelle parassite; se, invece, studiamo un impianto di piccole dimensioni, anche la più piccola corrente di pochi mA può causare gravi danni a una persona.

Quindi il neutro isolato si realizza solo quando abbiamo piccole estensioni di impianto perché in caso di guasto il contatto a terra può essere innescato dalle capacità parassite.

SICUREZZA ELETTRICA: CONTATTO DIRETTO E INDIRECTO

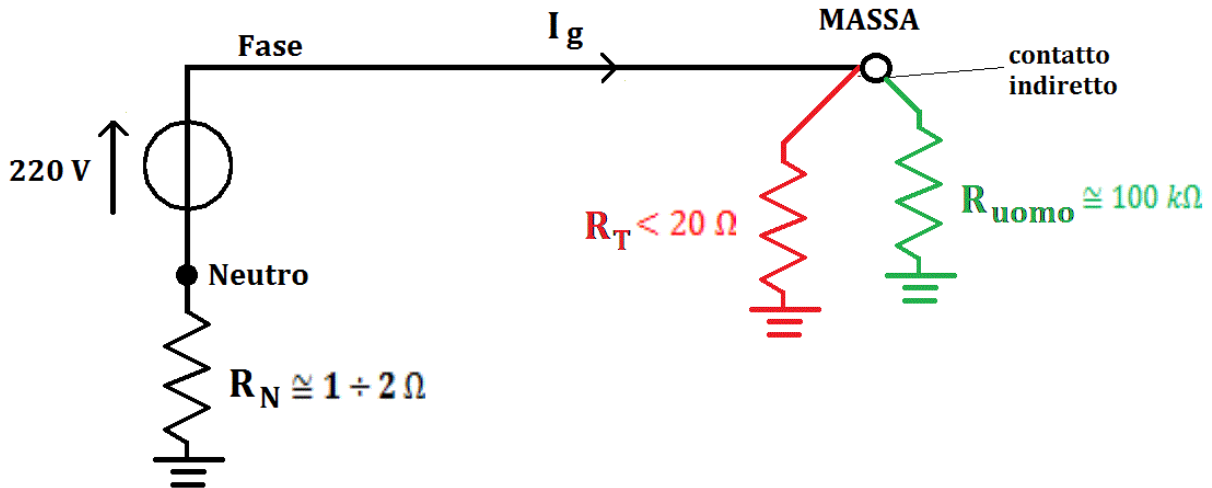
I pericoli dovuti a circolazione di corrente nel corpo possono essere causati da un **contatto diretto** o **indiretto**. Si ha contatto diretto quando l'individuo viene personalmente, cioè con una parte del proprio corpo, a contatto con una fase in tensione; il contatto indiretto avviene invece attraverso un involucro di materiale conduttore che ricopre un impianto e, in caso di guasto, fa da tramite tra la fase (o le fasi) difettosa e la persona che accidentalmente si trova in contatto con l'involucro:



Tutti gli involucri, che nel gergo si chiamano **masse**, sono sempre accessibili (es: frigoriferi, forni, lavatrici...) e quindi qualora l'isolamento dei componenti di un impianto dovesse cedere per qualsiasi motivo (usura del cavo, rosicchiamento di un topo, rottura termica ecc.) i fili di rame fanno contatto con le masse che diventano pericolose.

Vediamo cosa succede in caso di guasto a terra con contatto indiretto:

ESEMPIO DI GUASTO A TERRA CON CONTATTO INDIRETTO



Dallo schema sopra vediamo che abbiamo 220 V di tensione generata della fase che va a terra. Il neutro è collegato ad un impianto di terra con resistenza R_N . La corrente di guasto I_g scorre fino ad arrivare alla massa la quale può essere toccata accidentalmente da una persona (contatto indiretto) i cui piedi sono sufficientemente distanti dal dispersore da poter dire che il corpo è di fatto collegato alla terra lontana. In assenza di messa a terra, la persona riceve una tensione piena di 220 V e quindi il circuito si chiude al momento del contatto e l'uomo svolge il ruolo di resistore con resistenza R_{uomo} il cui valore è più alto rispetto a quello di terra.

A questo punto il circuito si comporta come un partitore di tensione in cui la tensione, tuttavia, viene incanalata integralmente sulla persona perché l'effetto della resistenza di terra è trascurabile e quindi la corrente che ne risulta può essere nociva se non fatale.

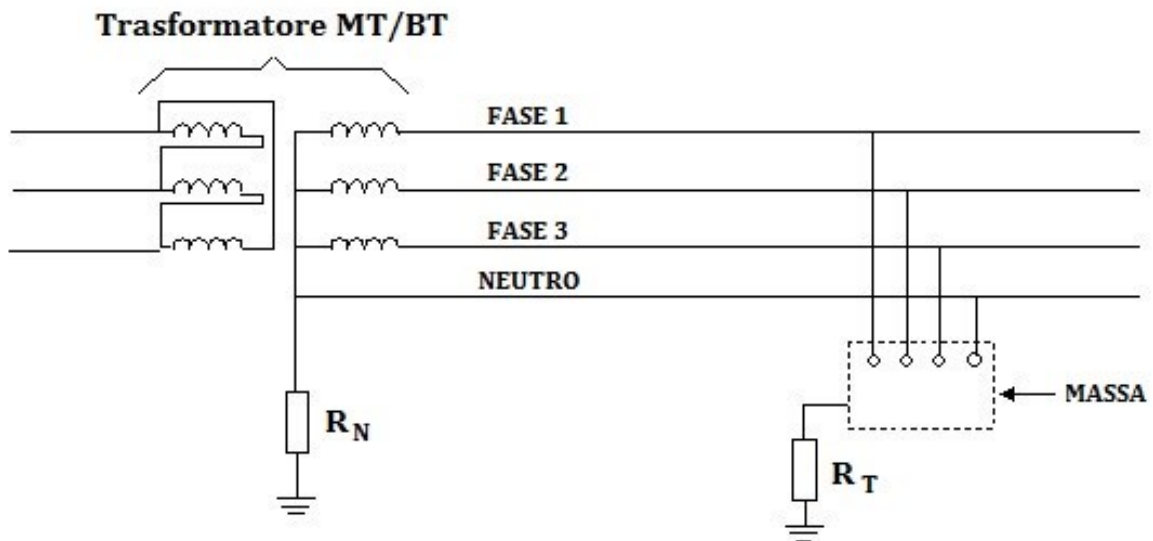
Per evitare la folgorazione della persona si posiziona una resistenza di terra locale R_T che per norma è minore di 20 Ω. A vuoto la tensione che arriva alla persona è sempre pericolosa perché siamo ancora nel caso di partitore di tensione con stavolta due resistenze trascurabili. Lo scopo di questa resistenza locale, infatti, non è quello di proteggere dalla corrente di guasto, bensì, di farla circolare verso terra in assenza di contatto indiretto. Quando la corrente di guasto circola nella resistenza locale allora è il segnale che c'è stato un cedimento nell'isolamento di qualche componente. Tale segnale, e quindi tale corrente, viene, nei giusti tempi, rilevata da un dispositivo che *disalimenta automaticamente* l'impianto detto **interruttore** (o **relè**) che sarà argomento delle prossime lezioni.

Vediamo ora quali sono i sistemi di messa a terra e come sono schematizzati...

SISTEMI DI PROTEZIONE ELETTRICA

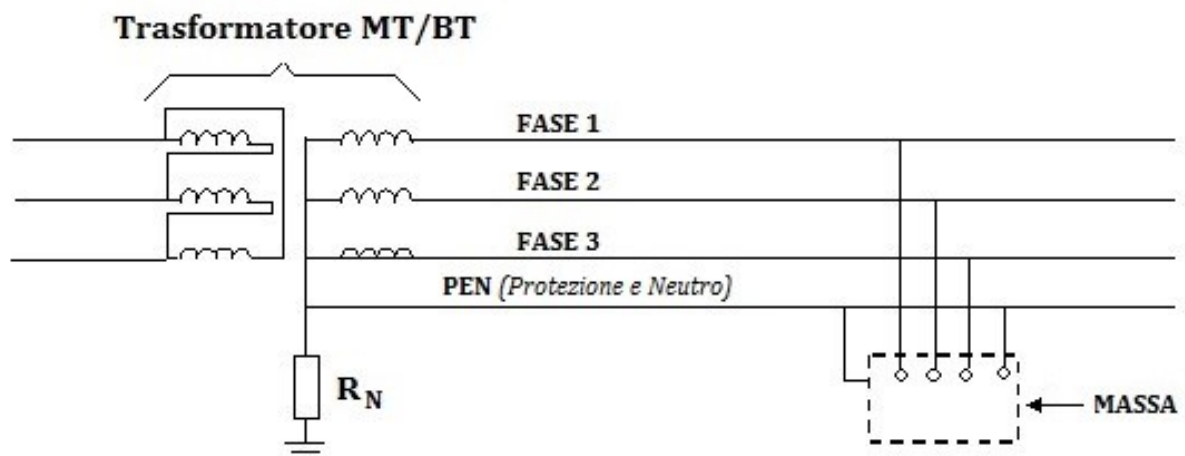
I **sistemi elettrici di protezione** in uso sono caratterizzati da una sigla composta da due lettere: la prima indica come viene connesso il neutro nella cabina di trasformazione, mentre la seconda sta a indicare come vengono connesse le masse.

TIPO TT



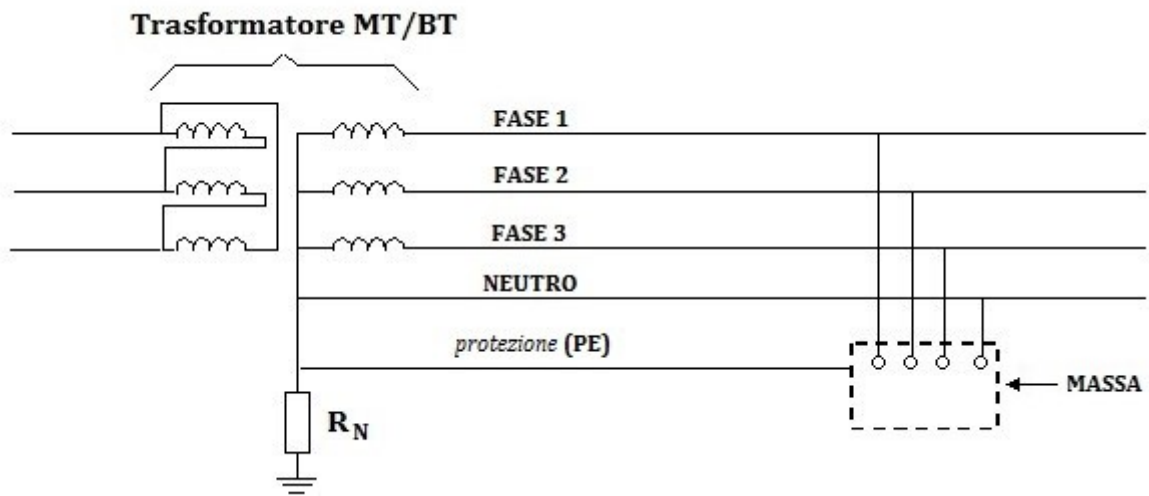
Il neutro è collegato direttamente a terra tramite una resistenza R_N e le masse degli utilizzatori sono collegate ad un impianto di terra locale, elettricamente indipendente da quello del neutro, tramite una resistenza di terra R_T . Il sistema TT viene adottato quando l'utente non è anche proprietario della cabina di trasformazione. Il sistema consente infatti di poter dimensionare le protezioni presso l'utente in maniera autonoma dalle caratteristiche del sistema di distribuzione.

TIPO TN-C



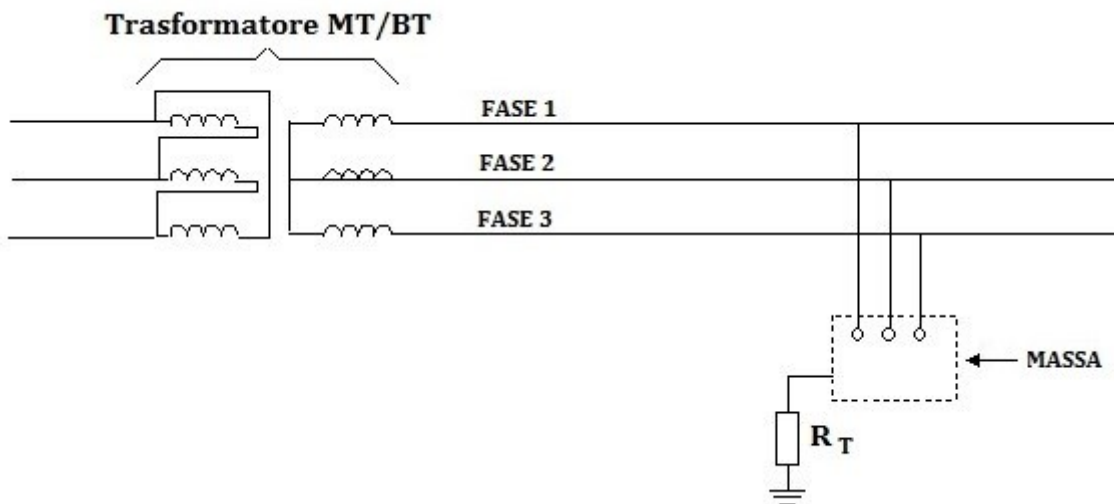
Il neutro è collegato direttamente a terra tramite una resistenza R_N e le masse degli utilizzatori sono collegate al neutro che svolge anche le funzioni di conduttore di protezione (**PEN**=Protezione Elettrica e Neutro). La lettera "C" sta per "comune" e indica appunto che il conduttore di protezione e il conduttore di neutro coincidono.

TIPO TN-S



Il collegamento a terra delle masse viene ottenuto tramite un conduttore di protezione (PE, dal tipico colore giallo e verde) separato dal conduttore di neutro (N). La lettera "S" indica appunto che il conduttore di protezione e il conduttore di neutro sono separati.

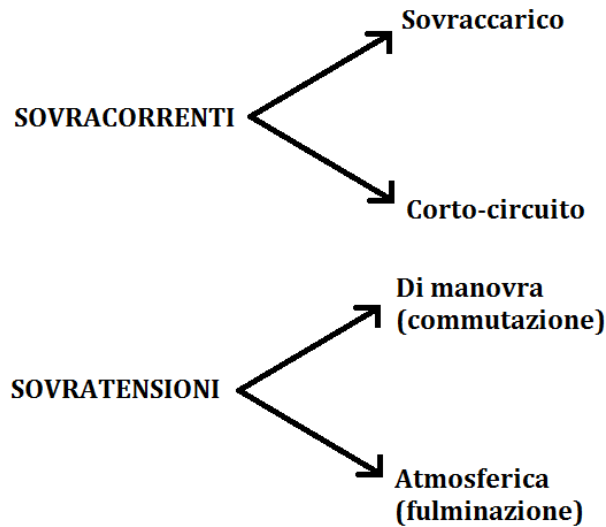
TIPO IT



Il neutro non viene distribuito ma isolato in cabina e le masse degli utilizzatori sono collegate ad un impianto di terra locale tramite una resistenza di terra R_T .

DISPOSITIVI ELETTRICI PER IMPIANTI BT

Tali dispositivi si dividono in: dispositivi di **protezione** e di **manovra** e in alcuni casi esistono apparecchi che assolvono entrambe le mansioni. I problemi che risolvono sono legati ai pericoli di **sovracorrenti** e **sovratensioni**:



SOVRACORRENTI

SOVRACCARICO

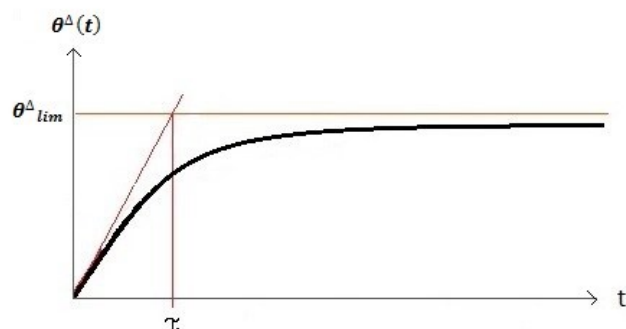
Il **sovraccarico** non corrisponde a un guasto, bensì ad un utilizzo eccessivo dell'impianto, ossia stiamo richiedendo più potenza di quanta possa sopportare il circuito (che conosciamo al momento del dimensionamento dell'impianto). Data la seguente relazione già nota in parte:

$$I_Z \geq I_B + \Delta I_B$$

Se l'incremento ΔI_B fa sì che la portata I_Z venga superata allora vuol dire che si sta generando una sovracorrente e che i conduttori sono sottoposti a *stress termico*. Riprendiamo l'espressione delle perdite Joule in funzione della capacità termica:

$$P = C_T \frac{d\theta^\Delta}{dt} + \lambda A \theta^\Delta$$

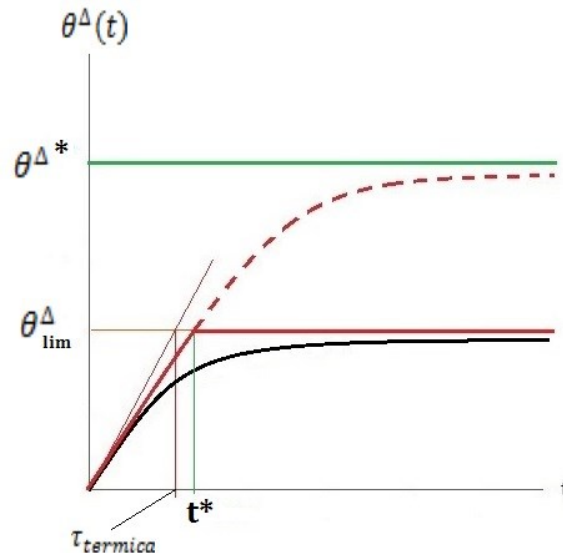
Quando era stata risolta avevamo ipotizzato che il transitorio elettrico fosse molto più veloce di quello termico e il grafico che ne derivava era il seguente:



Se la θ^Δ limite è la massima temperatura che un conduttore può sopportare per un tempo indefinito allora a quella determinata temperatura corrisponde anche la massima portata che il cavo può tollerare. In caso di sovraccarico anche alle perdite Joule si aggiunge un ΔP che fa superare la perdita massima consentita dal conduttore:

$$P + \Delta P = C_T \frac{d\theta^\Delta}{dt} + \lambda A \theta^\Delta$$

Di conseguenza il valore asintotico del grafico si alza pur mantenendo la curva tangente alla retta di individuazione della costante di tempo $\tau_{termica}$ (che rimane univocamente definita):



Da 0 al valore t^* le temperature sono ben sopportate dal cavo perché si trovano al di sotto di quella limite. La differenza con il grafico precedente è che in quest'ultimo il tempo considerato era infinito, ora invece abbiamo un tempo *limitato*, superato il quale cominciamo ad avere problemi di stress termico: dobbiamo quindi trovare un dispositivo in grado di interrompere il circuito in caso di raggiungimento del tempo t^* .

Notiamo, inoltre, che mano a mano che la potenza aumenta i t^* diminuiscono, avvicinandosi sempre più alla costante di tempo. Per questo motivo la protezione che andremo a ideare si dice a **tempo inverso** (più è alta la corrente è più sarà piccolo il tempo di intervento del dispositivo).

CORTO-CIRCUITO

Il **corto-circuito** invece è un guasto e causa problemi sia termici che meccanici. Quest'ultimi, in particolare sono legati a fenomeni di attrazione o repulsione spiegati dalla **forza di Lorentz**, data dal prodotto vettoriale tra la densità di corrente e il campo magnetico indotto:

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B}$$

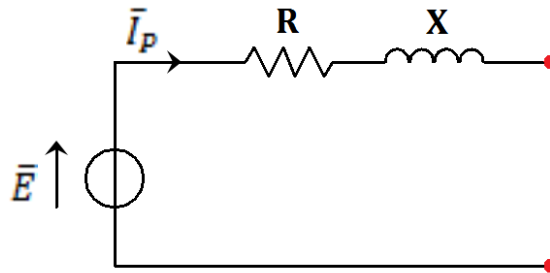
La forza di Lorentz afferma che due fili percorsi da correnti si attraggono se le correnti sono equiverse o si respingono se sono opposte. Le forze di Lorentz, quindi, sono sempre presenti nel circuito, ma se sono contenute a dovere dalle guaine i loro effetti non causano danni, mentre possono provocare forti dilatazioni (e quindi esplosioni) oppure implosioni in caso di corto-circuito che causa un brusco aumento della corrente nei conduttori.

Dal punto di vista dei problemi termici i conduttori subiscono un improvviso aumento di potenza termica assorbita, ma localmente, cioè dove avviene il contatto accidentale tra cavi inizialmente a tensioni diverse, si possono sviluppare *incendi* che si propagano lungo tutta la lunghezza dei cavi.

Siccome sia i problemi termici che quelli meccanici sorgono istantaneamente, allo stesso modo avremo bisogno di dispositivi in grado di intervenire altrettanto *istantaneamente* (non quindi a tempo inverso).

Vediamo, attraverso un esempio, di quantificare il corto-circuito...

Riprendiamo lo schema monofase equivalente di una linea corta (BT) sulla quale avviene un guasto trifase (cioè che coinvolge tutte e tre le fasi) in seguito a un corto-circuito (guasto indicato in rosso):



Se l'impedenza è trascurabile il corto-circuito trifase è detto *franco*, cioè libero, non mediato da un'impedenza che ne riduce l'intensità.

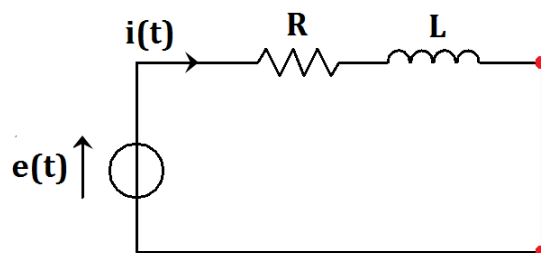
Possiamo ricavarci il valore del fasore della corrente in regime permanente sinusoidale:

$$\bar{I}_P = \frac{\bar{E}}{R + jX} = \frac{\bar{E}}{R + j\omega L}$$

Da cui è possibile passare alla $i_P(t)$ che, unita alla risposta libera del circuito, ci permette di individuare l'equazione della corrente totale $i(t)$:

$$i(t) = i_P(t) + i_{lib}(t)$$

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$



Determiniamo la risposta libera della corrente:

$$i_{lib}(t) = k \cdot e^{\alpha t} \quad \text{dove } \alpha = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau}$$

Esprimiamo in funzione dei fasori la risposta a regime permanente sinusoidale:

$$i_P(t) = I_M \sin(\omega t + \gamma - \varphi)$$

Dove:

$$I_M = |\bar{I}_P| \sqrt{2}$$

$$|\bar{I}_P| = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{con } E = \frac{E_M}{\sqrt{2}}$$

$$\varphi = \text{fase dell'impedenza} = \text{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

Otteniamo quindi:

$$i_p(t) = |\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \gamma - \text{arctg} \frac{\omega L}{R}\right)$$

Da cui:

$$i(t) = |\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \gamma - \text{arctg} \frac{\omega L}{R}\right) + k \cdot e^{\alpha t}$$

N.B.: c'è una relazione tra α e l'argomento di φ :

$$\alpha = -\frac{R}{L} \cdot \frac{\omega}{\omega} \Rightarrow \frac{1}{\tau} = \frac{\omega R}{\omega L} \Rightarrow \tau = \frac{\omega L}{\omega R} \Rightarrow \tau \omega = \frac{\omega L}{R} \Rightarrow \frac{\omega}{\alpha} = \tan \varphi$$

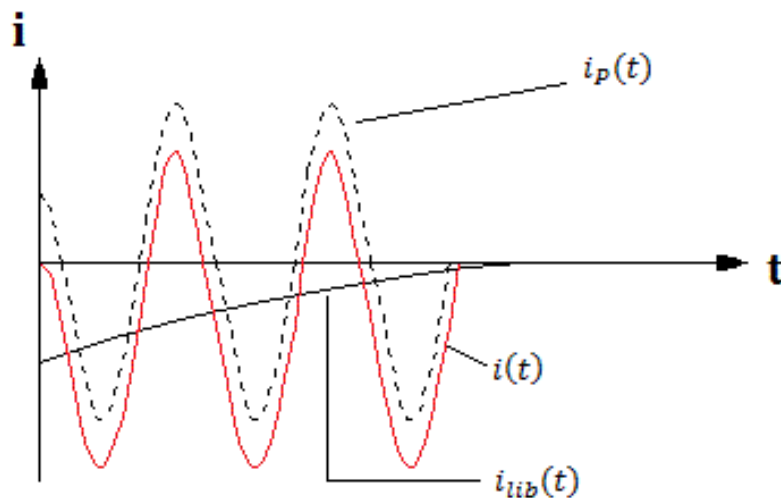
PROBLEMA DI CAUCHY

$$i(0) = 0 \Rightarrow |\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin(\gamma - \varphi) + k = 0 \Rightarrow k = -|\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin(\gamma - \varphi)$$

Quindi:

$$i(t) = |\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \gamma - \text{arctg} \frac{\omega L}{R}\right) - |\bar{I}_P| \sqrt{2} \sin(\gamma - \varphi) \cdot e^{\alpha t}$$

Rappresentiamo l'andamento della corrente di cortocircuito appena individuata:

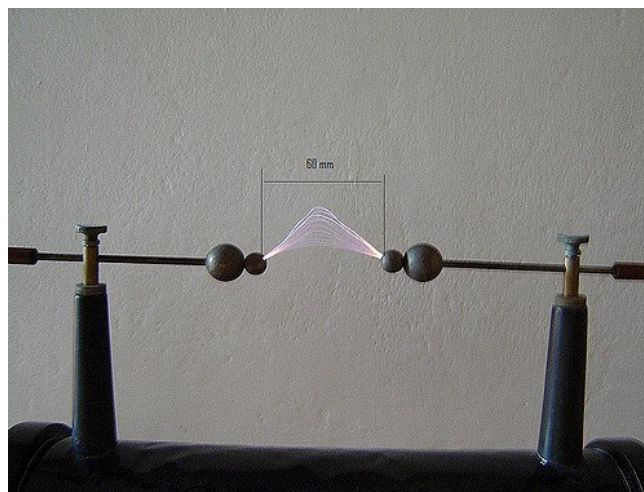


N.B.: il valore massimo della corrente di cortocircuito è maggiore di quello che era il valore massimo $|\bar{I}_P| \sqrt{2}$. Inoltre se avessimo $\gamma = \varphi$ l'evoluzione libera non ci sarebbe mai; per intenderci: è come se montassimo su

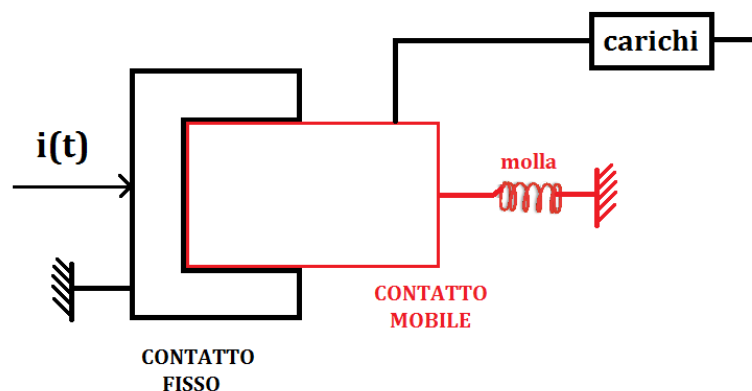
un tapis roulant, che viaggia a tot metri al secondo, con la sua stessa velocità in modo tale da non sentire il transitorio.

L'INTERRUTTORE

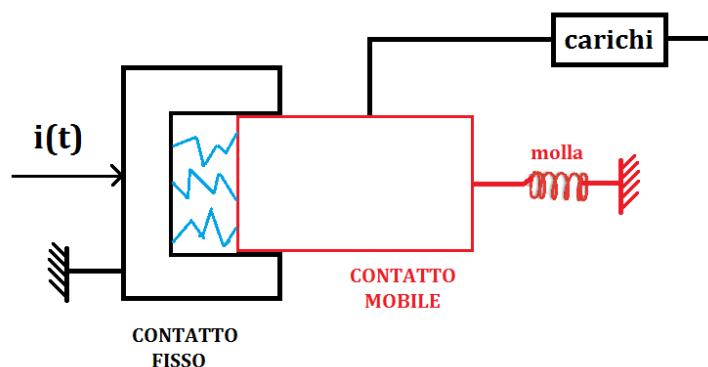
L'**interruttore** è un dispositivo in grado di disalimentare una porzione di impianto a prescindere dalla esistenza o meno di un guasto, ossia può svolgere sia il ruolo di protezione che di manovra. La discriminante per la quale l'interruttore svolge anche la funzione di protezione è dovuta al cosiddetto **arco elettrico** che è un fenomeno che si verifica durante le operazioni di apertura e di chiusura di un circuito elettrico e consiste in un canale luminoso prodotto dalla ionizzazione dell'aria. Quello che si verifica è una perforazione del dielettrico (l'aria), e si ha quindi la formazione dell'arco elettrico. L'aria diventa pertanto conduttrice, e la sua conduttività viene aumentata dall'incremento di temperatura, che raggiunge valori assai elevati:



Lo schema di un interruttore è il seguente:



C'è un *contatto fisso* metallico dove arriva la corrente all'interno del quale viene alloggiato il *contatto mobile* dotato di una *molla* che ne permette lo scorrimento lungo il contatto fisso. È previsto poi un ulteriore contatto che porta la corrente ai carichi. Se il sistema è trifase avremmo tre contatti fissi e tre contatti mobili (quattro se vi è anche la presenza del neutro). Disalimentare vuol dire fare in modo che non passi più corrente tra contatto fisso e mobile.



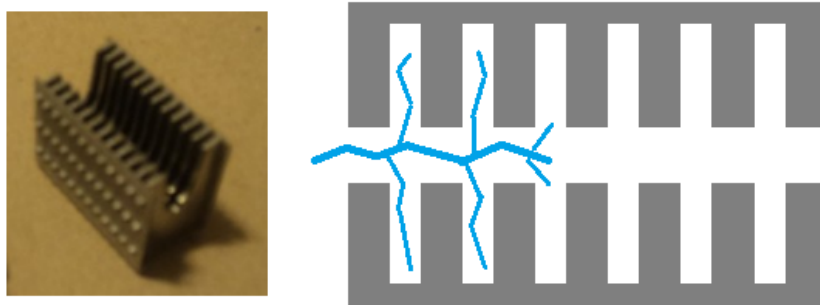
Se la molla si attiva, il contatto mobile comincia a sfilare dal contatto fisso, l'aria all'interno dell'intercapedine si ionizza e dà luogo agli archi elettrici che saranno tanto più intensi a seconda dell'intensità della corrente che viene interrotta.

In realtà non abbiamo una vera e propria interruzione perché tra i due contatti metallici sono sovrapposti degli archi elettrici conduttori che a livello termico riscaldano molto di più l'involucro rispetto alla situazione di contatto che c'era prima e quindi necessitiamo di intervenire prima che fondi tutto.

A tale scopo, l'interruttore deve essere dotato di **sistemi di estinzione** degli archi elettrici. Esistono molteplici tecniche di estinzione: per l'alta tensione, per esempio, dove gli archi raggiungono notevoli dimensioni si cerca di adottare soluzioni per deionizzare l'aria come la realizzazione di **interruttori ad olio** dove man a mano che viene estratto il contatto mobile, lo spazio del dielettrico viene occupato da olio nel quale l'aria ionizzata crea delle bolle di gas che si spostano dalle zone calde (dove si sviluppano gli archi) alle zone fredde (dove poi si disperdono nell'ambiente) lasciando nello spazio tra i contatti solo l'olio freddo.

In altri casi vengono utilizzati i cosiddetti **interruttori serie SF6**, cioè si sfrutta l'azione dell'esa-fluoruro di zolfo in cui il fluoro, essendo molto elettronegativo, tende ad attirare un gran numero di elettroni e quindi a diminuire il tasso di ionizzazione dell'aria.

Per la bassa tensione, invece, vengono realizzate delle piccole camere separate da lamelle all'interno del quale l'arco elettrico si "divide" e perde di potenza fino ad estinguersi:



La massima corrente che un interruttore può bloccare è detta **potere di interruzione**.

SEZIONATORI

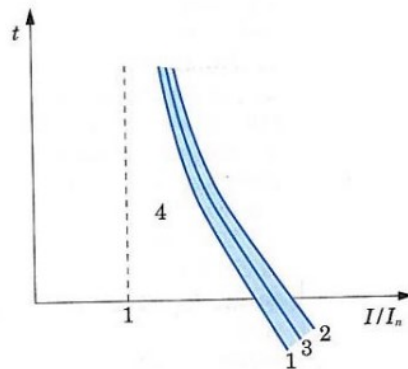
I **sezionatori** (o in inglese "switch") sono dispositivi di solo manovra e si dividono in: sezionatori **sottocarico** e **a vuoto**. I primi sono in grado di interrompere piccole correnti di arco mentre i secondi non sono in grado di estinguere alcun tipo di arco ma in compenso svolgono operazioni di manovra anche dopo che è stata interrotta la corrente da un sezionatore sottocarico o da un interruttore (per questa sua caratteristica la sua presenza è di fondamentale importanza nelle operazioni di manutenzione elettrica degli impianti).

FUSIBILI

Sono dispositivi solo di protezione, incapaci di manovra, ma in grado di interrompere gli archi. Sono detti dispositivi di sacrificio perché vengono sottodimensionati a livelli di portata che corrispondono a valori di corrente, poco più bassi di quelli per i quali si avrebbero problemi all'impianto, che portano alla fusione del fusibile e quindi alla separazione dei contatti.



Per quanto riguarda la **caratteristica di intervento** (curva tempo-corrente) i fusibili sono dispositivi a tempo inverso: per intervenire devono immagazzinare una certa quantità di energia termica, necessaria per il riscaldamento dell'elemento conduttore e per la sua successiva fusione ed evaporazione:

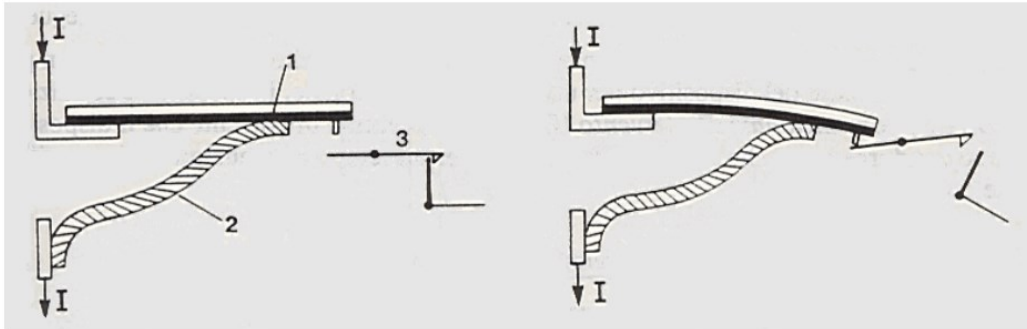


I RELÉ

I **relè** sono i sensori che mettono in moto l'interruttore. Esistono diversi tipi di relè: **termico**, che gestisce il sovraccarico, **magnetico**, che gestisce il cortocircuito e **differenziale**, che gestisce il guasto a terra. Avremo quindi interruttori con relè termico, magnetico, differenziale o con tutte e tre le caratteristiche.

RELÉ TERMICO

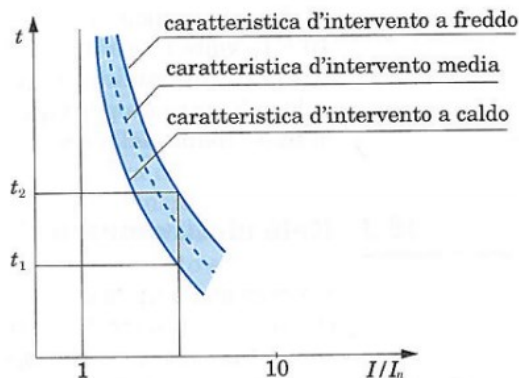
Si tratta di un relè provvisto di un dispositivo di sgancio sensibile alla temperatura. Secondo lo schema sotto, il rilascio si basa sul diverso coefficiente di dilatazione termica dei due diversi metalli che compongono la lamina bimetallica (1): la corrente I , condotta dal cavo flessibile (2), ne provoca il riscaldamento e il progressivo incurvamento, fino a determinare lo scatto del meccanismo di sgancio (3), con la conseguente apertura del circuito di alimentazione. Per il ripristino manuale del dispositivo di sgancio occorre attendere che la lamina bimetallica si sia sufficientemente raffreddata.



– Principio di funzionamento di un relè termico: 1) lamina bimetallica, 2) cavo flessibile, 3) meccanismo di sgancio.

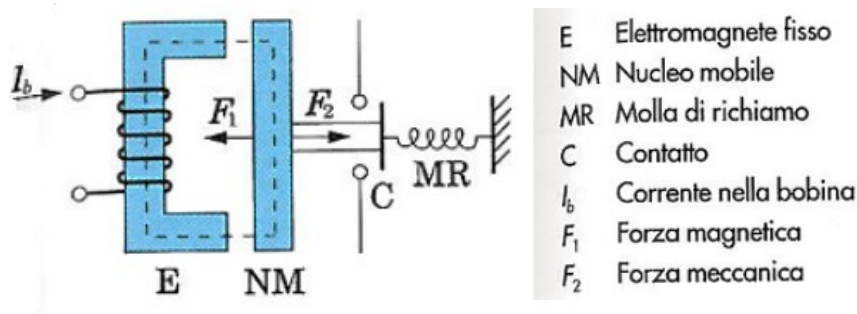
Il relè termico è uno sganciatore a tempo inverso: all'aumentare della corrente, diminuisce il tempo di intervento, in quanto la lamina impiega meno tempo a raggiungere la temperatura sufficiente a produrre la deformazione utile all'intervento del dispositivo. Se la lamina parte dalla temperatura ambiente (**intervento a freddo**) occorre un certo tempo per l'intervento, mentre se la temperatura iniziale è maggiore, perché il relè è già funzionante, occorrerà un minor salto termico e quindi un tempo minore (**intervento a caldo**).

Pertanto, per ogni valore di corrente, esisteranno due tempi di intervento (t_1 a caldo, t_2 a freddo) e due punti sul piano (I, t): uno superiore a freddo e l'altro inferiore a caldo:



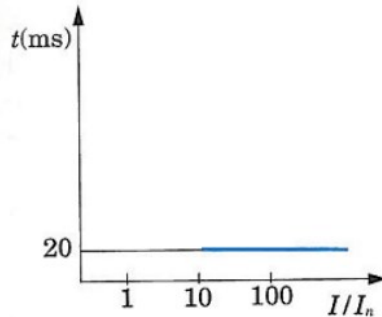
Il relè termico è tipicamente adatto per la protezione da sovraccarico e non da cortocircuito: è infatti un dispositivo *lento*, perché basato su fenomeni termici.

RELÉ MAGNETICO



Il funzionamento del relè elettromagnetico si basa sulla forza magnetica F_1 che un elettromagnete esercita su un nucleo mobile in ferro collegato a una molla. Quando la forza magnetica F_1 supera la forza meccanica F_2 offerta dalla molla, ossia quando la corrente I_B supera un valore di soglia di intervento, il relè interviene.

Il relè elettromagnetico ha quindi un tempo di intervento *indipendente* dal valore della corrente, purché essa sia superiore al valore che determina l'attrazione del nucleo mobile, vincendo la forza della molla. Se non è presente un dispositivo ritardatore, la sua caratteristica di intervento è del tipo a tempo indipendente, a scatto istantaneo:



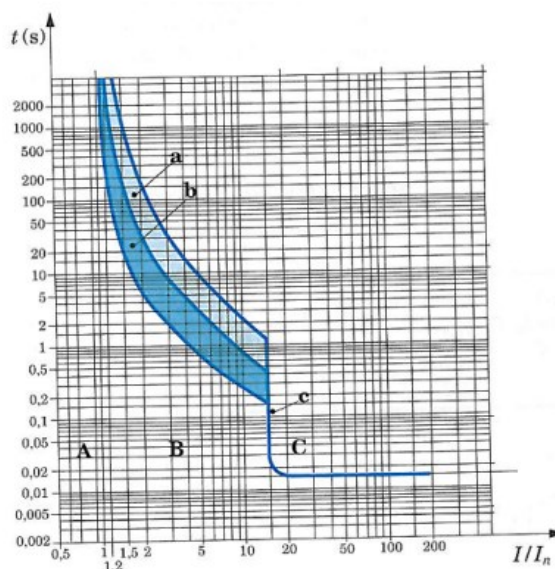
Il relè elettromagnetico, essendo a scatto istantaneo, è tipicamente adatto per la protezione dalle sovracorrenti di cortocircuito, caratterizzate da elevata intensità e breve durata tollerabile.

RELÉ MAGNETOTERMICO

Utilizzando contemporaneamente un relè termico e uno magnetico si ottiene un interruttore **magnetotermico**, che è un ottimo dispositivo per la protezione da sovraccarichi e cortocircuiti: la regolazione delle correnti di intervento, infatti, fa sì che per sovracorrenti non molto intense intervenga il termico, per valori superiori il magnetico.

Nelle caratteristiche d'intervento degli interruttori magnetotermici si distinguono:

- **Zona A** ($I < I_n$): zona di non intervento;
- **Zona B** ($I_n < I < 15I_n$): zona di protezione dai sovraccarichi, in cui interviene lo sganciatore termico, con un tempo tanto minore quanto maggiore è il valore della sovracorrente;
- **Zona C** ($I > 15I_n$): zona tipica delle correnti di cortocircuito, in cui interviene lo sganciatore magnetico, che ha un tempo di intervento minore.

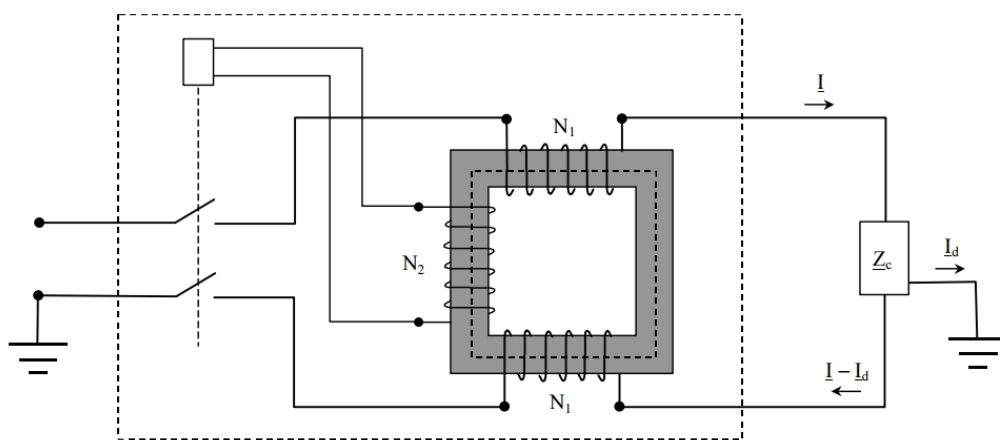


Dove:

- a) Sganciatore termico a freddo b) Sganciatore termico a caldo c) Sganciatore magnetico fisso

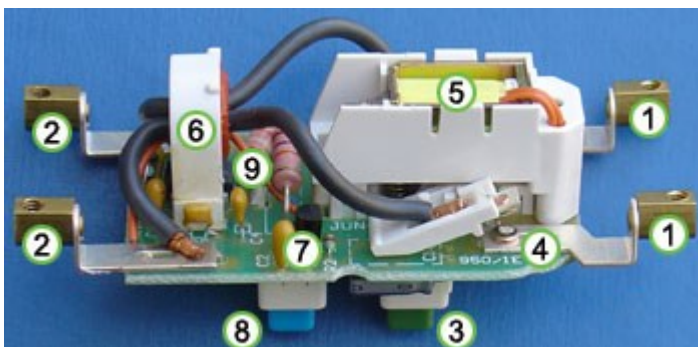
RELÉ DIFFERENZIALE

La linea tratteggiata della figura sotto delimita i componenti che costituiscono lo schema di principio di un **relè differenziale** monofase. Intorno ad un nucleo magnetico toroidale vengono effettuati due avvolgimenti (uno per il neutro e uno per la fase) di uguale numero di spire N_1 , percorsi dalla corrente fornita dall'alimentazione e diretta verso l'impedenza di carico Z_c . Se la corrente entrante è uguale a quella uscente, i flussi di induzione prodotti dai due avvolgimenti sono uguali e di segno opposto: il flusso netto nel nucleo è nullo e l'interruttore non scatta.



Schema di relè differenziale monofase.

Se a causa di un guasto viene derivata verso terra una corrente I_d , la disuguaglianza fra la corrente entrante, I , e quella uscente, $I - I_d$, altera il precedente equilibrio fra i flussi di induzione: si manifesta un flusso netto che, concatenandosi con le N_2 spire di un terzo avvolgimento, vi determina una f.e.m. indotta e la circolazione di una corrente che, eccitando il relè, causa l'attivazione di una ancorina, la quale innescando lo scatto di una [molla](#) che apre l'interruttore e provoca il distacco dell'alimentazione. Questo dispositivo è caratterizzato da una *corrente differenziale nominale di intervento*, definita come il valore minimo $I_{\Delta N}$ della differenza fra i valori efficaci delle correnti sufficiente a provocare l'apertura del circuito. Il relè differenziale avente una corrente nominale di sicuro intervento $I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$, viene abitualmente impiegato per la protezione contro i guasti a terra: quando, per la perdita di isolamento di un conduttore di alimentazione, la massa si trova a essere accidentalmente in tensione, la corrente dispersa a terra provoca l'intervento della protezione differenziale.



Interruttore differenziale aperto:

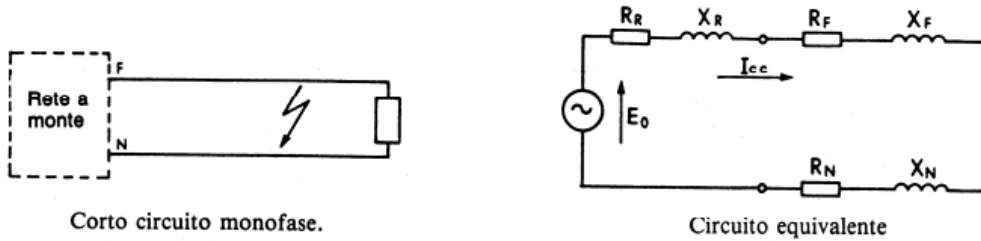
- 1 Morsetti di ingresso
- 2 Morsetti di uscita (verso il carico)
- 3 Pulsante di inserimento
- 4 Contatti di interruzione
- 5 Solenoide che tiene chiusi i contatti
- 6 Trasformatore di corrente (sensore)
- 7 Circuito elettronico amplificatore
- 8 Pulsante di test
- 9 Filo (arancio) che alla pressione di test è attraversato da una corrente sbilanciata

TIPOLOGIE DI GUASTI E VALUTAZIONE DELLA CORRENTE DI CORTO-CIRCUITO

In generale la corrente di cortocircuito avevamo visto essere:

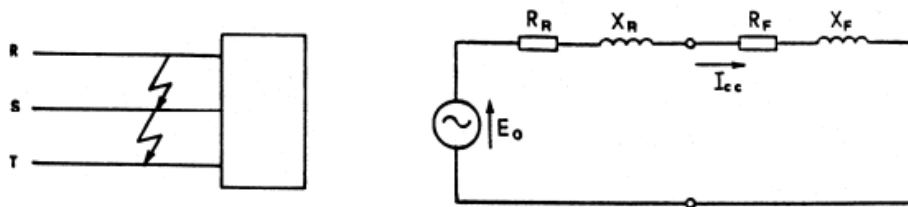
$$I_{cc} = \frac{|E|}{|Z|}$$

LINEA MONOFASE



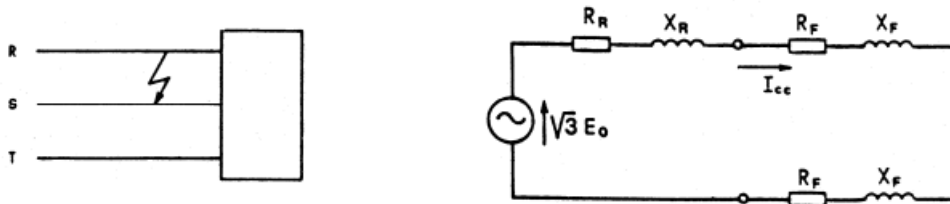
$$I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{(R_R + R_F + R_N)^2 + (X_R + X_F + X_N)^2}}$$

LINEA TRIFASE: CORTOCIRCUITO TRIFASE



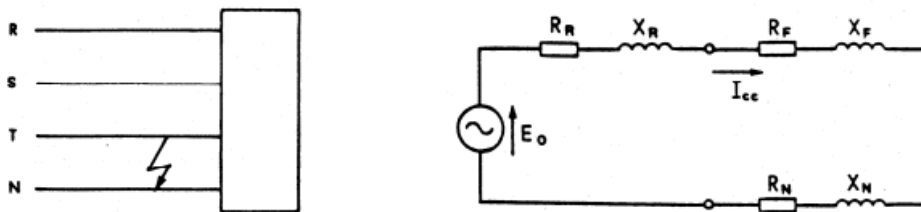
$$I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{(R_R + R_F)^2 + (X_R + X_F)^2}}$$

LINEA TRIFASE: CORTOCIRCUITO FASE-FASE



$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}E_0}{2\sqrt{(R_R + R_F)^2 + (X_R + X_F)^2}}$$

LINEA TRIFASE: CORTOCIRCUITO FASE-NEUTRO



$$I_{cc} = \frac{E_0}{\sqrt{(R_R + R_F + R_N)^2 + (X_R + X_F + X_N)^2}}$$

Riassumendo la corrente maggiore è quella che si verifica nel cortocircuito trifase (e sarà quella che si deve considerare a inizio linea) mentre quella minore è quella nel circuito monofase e sarà quella che si deve considerare a fine linea.

ESERCITAZIONE LABORATORIO - ANDAMENTO CORRENTE CORTOCIRCUITO IN GUASTO FRANCO

$$E := 230 \qquad \omega := 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.159$$

$$E_M := \sqrt{2} \cdot E = 325.269$$

$$e_{fase}(t, \gamma) := E_M \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma)$$

$$r := 0.1 \qquad x := 0.07$$

$$R(a) := r \cdot a \qquad X(a) := x \cdot a$$

$$Z(a) := R(a) + 1i \cdot X(a)$$

Individuiamo il fasore della tensione:

$$E_f(\gamma) := E \cdot e^{(1i \cdot \gamma)}$$

$$E_f(0) = 230$$

Calcolo fasore corrente di cortocircuito con guasto trifase franco:

$$I_{tf}(a, \gamma) := \frac{E_f(\gamma)}{Z(a)}$$

$$I_{tf}(0.1, 0) = 1.544 \cdot 10^4 - 1.081i \cdot 10^4$$

$$|I_{tf}(0.1, 0)| = 1.884 \cdot 10^4$$

In caso di guasto bifase la corrente sar  la met :

$$I_{bf}(a, \gamma) := \frac{E_f(\gamma)}{2 \cdot Z(a)}$$

$$I_{bf}(0.1, 0) = 7.718 \cdot 10^3 - 5.403i \cdot 10^3$$

$$|I_{bf}(0.1, 0)| = 9.421 \cdot 10^3$$

Ora scriviamo la soluzione temporale della corrente di cortocircuito con guasto trifase:

$$i(t) := \boxed{i_{lib}}(t) + i_{perm}(t)$$

argomento dell'impedenza:

$$\varphi := \text{atan}\left(\frac{X(0.1)}{R(0.1)}\right) = 0.611$$

$$i_{perm}(t, a, \gamma) := \sqrt{2} \cdot |I_{tf}(a, \gamma)| \cdot \sin(\omega \cdot t + \gamma - \varphi)$$

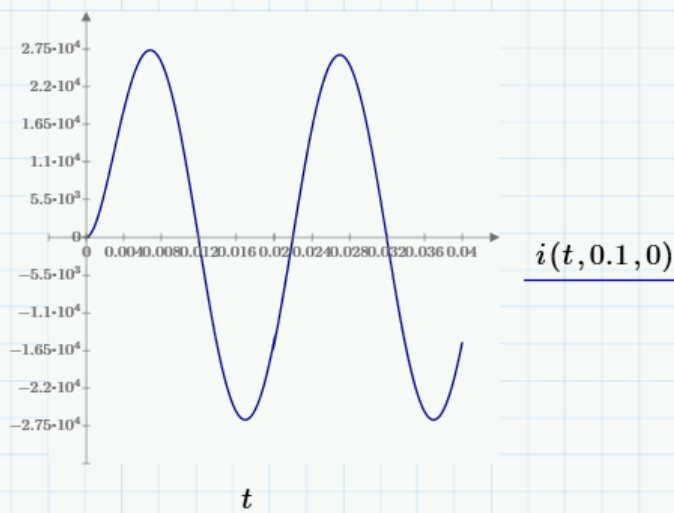
$$i_{lib}(t) := k \cdot e^{-\frac{R(a)}{X(a)} \cdot \omega \cdot t} \quad \text{sapendo che } k = -i_{perm}(0):$$

$$i_{lib}(t, a, \gamma) := -\left(\sqrt{2} \cdot |I_{ef}(a, \gamma)| \cdot \sin(\gamma - \varphi)\right) \cdot e^{-\frac{R(a)}{X(a)} \cdot \omega \cdot t}$$

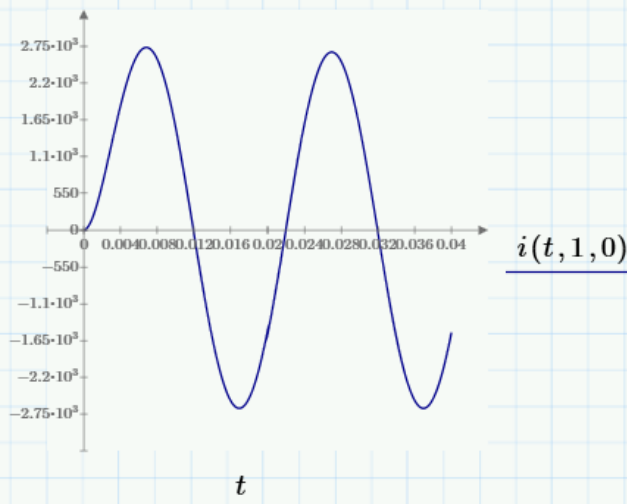
$$i(t, a, \gamma) := i_{lib}(t, a, \gamma) + i_{perm}(t, a, \gamma)$$

$$t := 0, 10^{-4} \dots 40 \cdot 10^{-3}$$

grafico considerando una distanza di 100 metri con fase iniziale nulla:



possiamo notare che i picchi hanno valori maggiori del valore efficace della corrente che era $1.884 \cdot 10^4$ A. i picchi, tuttavia, all'aumentare della distanza, hanno un calo. Considerando un km per esempio:



INTEGRALE DI JOULE (O ENERGIA SPECIFICA)

Durante il cortocircuito la corrente assume un valore molto più elevato di quello relativo al normale funzionamento; ciò provoca anche un surriscaldamento del cavo e delle apparecchiature interessate. Riprendiamo l'espressione della potenza Joule che avevamo già visto nella scorsa lezione:

$$P = C_T \frac{d\theta^\Delta}{dt} + \lambda A \theta^\Delta$$

Dove il primo termine è riferito all'incremento di temperatura che avviene nel cavo, mentre il secondo è dovuto allo scambio termico con l'ambiente. Tuttavia, data la rapidità d'intervento dei dispositivi di protezione, il riscaldamento può essere considerato *adiabatico* (senza scambio di calore con l'esterno). Quindi possiamo scrivere:

$$P = C_T \frac{d\theta^\Delta}{dt}$$

Dove $P = Ri^2(t)$ con R che rappresenta l'impedenza a monte dell'interruttore. Risolvendo otteniamo:

$$i^2(t) \rho (1 + \alpha\theta^\Delta) \frac{l}{S} = C'_T \cdot l \cdot S \cdot \frac{d\theta^\Delta}{dt}$$

Con C'_T = calore specifico per unità di volume

Risolviamo l'integrale per separazione delle variabili ottenendo:

$$\rho (1 + \alpha\theta^\Delta) \cdot \frac{l}{S} \cdot i^2(t) \cdot dt = C'_T \cdot l \cdot S \cdot d\theta^\Delta$$

$$i^2(t) \cdot dt = \frac{C'_T \cdot S^2}{\rho (1 + \alpha\theta^\Delta)} \cdot d\theta^\Delta$$

$$\int_0^{t_i} i^2(t) \cdot dt = \int_{\theta_0}^{\theta_f} \frac{C'_T \cdot S^2}{\rho(1 + \alpha\theta^\Delta)} \cdot d\theta^\Delta$$

Dove: t_i = tempo di interruzione del dispositivo

θ_0 = temperatura iniziale del cavo

θ_f = temperatura finale del cavo

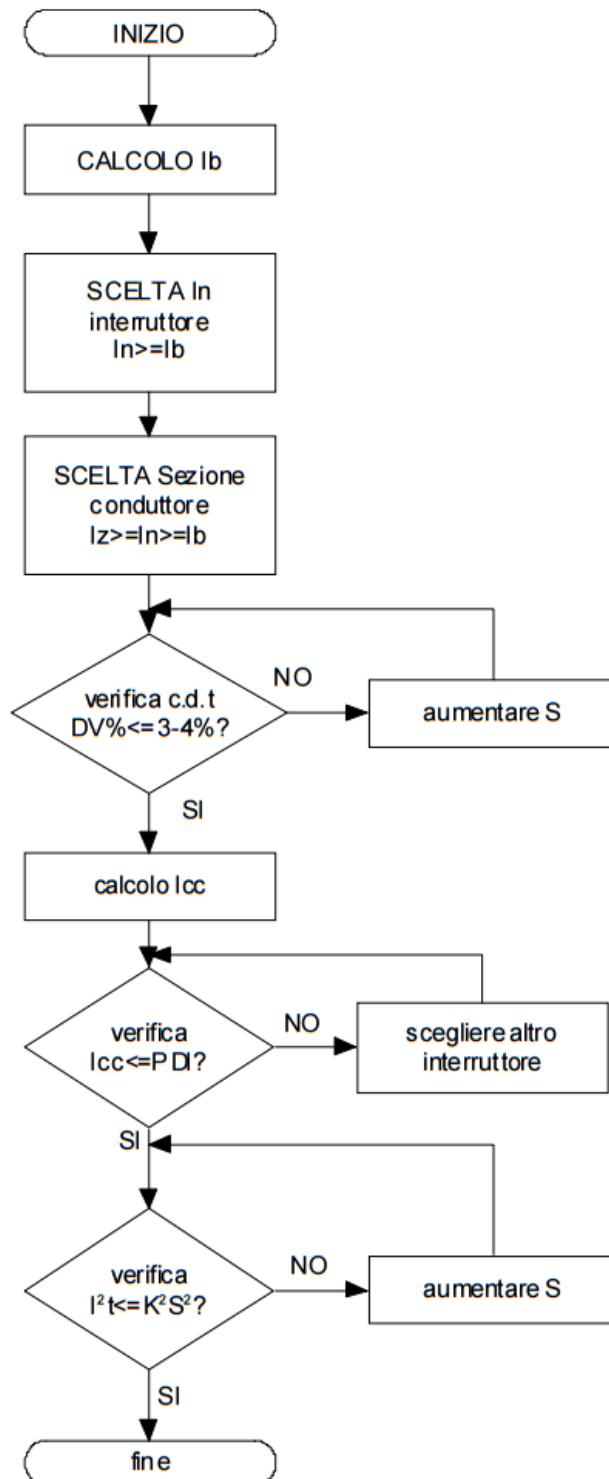
Il primo membro, noto come **Integrale di Joule**, esprime l'energia specifica passante che transita nell'apparecchio di manovra e protezione (sarebbe l'energia che lascia passare l'interruttore). Il secondo membro esprime l'energia massima tollerata dal cavo e, attraverso opportune operazioni, può essere ridotto al termine:

$$\int_{\theta_0}^{\theta_f} \frac{C'_T \cdot S^2}{\rho(1 + \alpha\theta^\Delta)} \cdot d\theta^\Delta \Rightarrow K^2 S^2 = cost$$

In ambito impiantistico tale formula viene semplificata ulteriormente e applicata per il calcolo di verifica della protezione del cavo dal corto circuito con la seguente relazione finale in cui il primo membro deve avere un valore energetico sempre inferiore del secondo:

$$i^2 \cdot t_i \leq K^2 S^2$$

Per avere una comoda panoramica di tutto quello che abbiamo visto del dimensionamento globale di un impianto, è utile osservare il seguente schema:

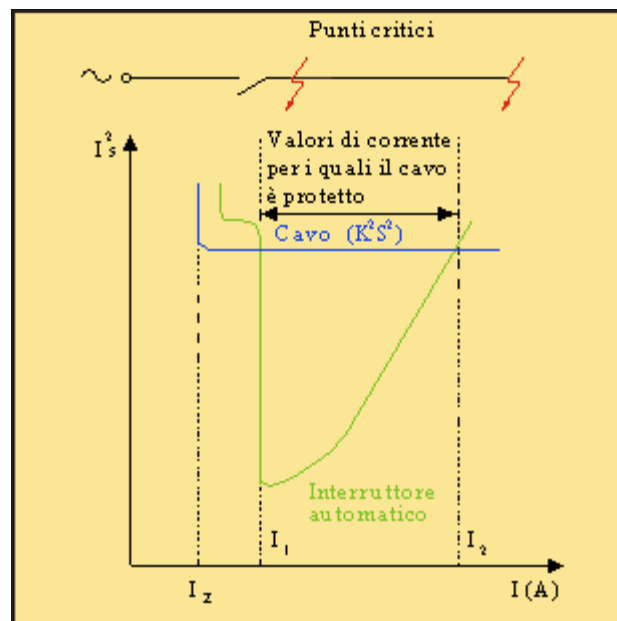


Tornando alla protezione dal cortocircuito, a seconda che la protezione avvenga tramite interruttore oppure fusibile occorre fare alcune distinzioni a partire dall'osservazione delle loro rispettive **curve di energia specifica** confrontate con le caratteristiche del cavo dettate da $K^2 S^2$.

INTERRUTTORE MAGNETOTERMICO

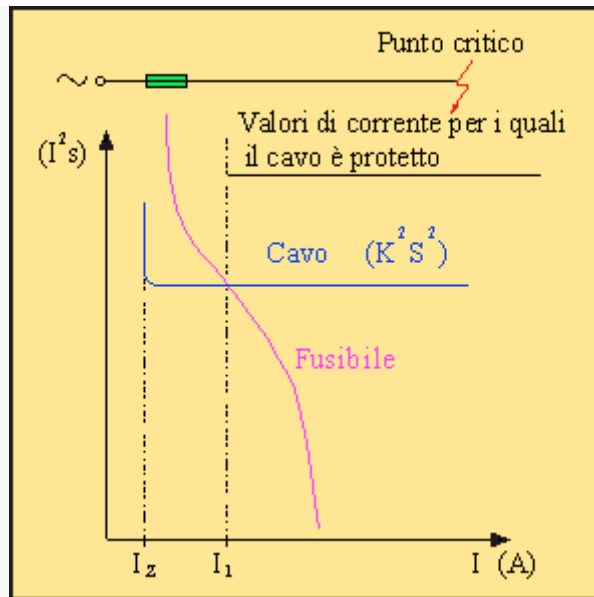
L'energia specifica passante, come è possibile notare in figura, diminuisce in corrispondenza dell'intervento del relè magnetico; successivamente aumenta perché il tempo d'intervento rimane pressoché costante all'aumentare della corrente. Confrontando la curva dell'energia specifica passante sopportabile dal cavo, individuata dal prodotto $K^2 S^2$, con la curva dell'energia specifica lasciata passare dal dispositivo, risulta che la disequazione trovata in precedenza è soddisfatta per tutti i valori compresi tra le correnti I_{ccm} (corrente di corto circuito minima presunta in fondo alla linea → *cortocircuito fase-neutro*) e I_{ccM} (corrente di corto circuito massima presunta all'inizio della linea → *cortocircuito trifase franco*). Sul grafico dell' $I^2 t$ si traccia la curva corrispondente al valore $K^2 S^2$ del cavo. Se la caratteristica del cavo è completamente al di sopra di quella dell'interruttore, il cavo è protetto, altrimenti si individuano i valori I_1 e I_2 . La protezione è assicurata se risultano verificate le seguenti relazioni:

$$I_2 \geq I_{ccM} \quad e \quad I_1 \leq I_{ccm}$$



FUSIBILI

Sono dispositivi limitatori e come tali l'energia specifica passante decresce all'aumentare della corrente di cortocircuito. Per tutte le correnti superiori a I_{ccm} (corrente di corto circuito minima in fondo alla linea) l'integrale di Joule è verificato, mentre, per tutti i valori inferiori a I_{ccm} l'energia passante attraverso il fusibile diventa eccessiva per la protezione del cavo. Per la verifica si impiegano i grafici, forniti dal costruttore, indicanti il valore dell' $I^2 t$ del fusibile, sui quali si traccia la caratteristica $K^2 S^2$ del cavo. Se quest'ultima cade completamente al di sopra della caratteristica del fusibile, il cavo è protetto per ogni valore di corrente di corto circuito. Viceversa, se le due curve si intersecano, il punto di intersezione individua il valore di corrente I_1 . Il cavo è protetto se il valore di I_1 è inferiore a quello relativo alla minima corrente di corto circuito presunta ($I_1 \leq I_{ccm}$).



PROTEZIONE DAL SOVRACCARICO

I circuiti di un impianto devono essere provvisti di dispositivi di protezione adatti ad interrompere correnti di sovraccarico prima che esse possano provocare un riscaldamento eccessivo ed il conseguente danneggiamento dell'isolante dei cavi.

Per garantire tale protezione è necessario che vengano rispettate le seguenti regole:

- Regola 1) $I_B \leq I_n \leq I_Z$
- Regola 2) $I_f \leq 1,45 I_Z$

Dove:

I_B = Corrente di impiego del circuito

I_n = Corrente nominale dell'interruttore

I_Z = Portata a regime permanente del cavo

I_f = Corrente di sicuro funzionamento dell'interruttore

La prima regola soddisfa le condizioni generali di protezione dal sovraccarico. La regola 2, impiegando per la protezione dal sovraccarico un interruttore, è sempre verificata, poiché la corrente di sicuro funzionamento I_f non è mai superiore a $1,45 I_n$. Essa deve essere invece verificata nel caso in cui il dispositivo di protezione sia un fusibile.

Analizzando la regola generale di protezione $I_B \leq I_n \leq I_Z$ risulta evidente che si possono ottenere due condizioni di protezione distinte: una condizione di massima protezione, realizzabile scegliendo un interruttore con una corrente nominale prossima o uguale alla corrente di impiego I_B , ed una condizione di minima protezione scegliendolo con una corrente nominale prossima o uguale alla massima portata del cavo I_Z . Scegliendo la condizione di massima protezione si potrebbero verificare delle situazioni tali da pregiudicare la continuità di servizio, perché sarebbe garantito l'intervento dell'interruttore anche in caso di anomalie sopportabili. Per contro la scelta di un interruttore con una corrente regolata uguale alla portata del cavo porterebbe alla massima continuità di servizio a discapito del massimo sfruttamento del

rame installato. Queste considerazioni vengono affidate al progettista in funzione del tipo di circuito da realizzare.

TENSIONE TOTALE DI TERRA

Tensione che una massa o una massa estranea assumono in caso di guasto verso terra. Se il guasto è caratterizzato dalla corrente di dispersione verso terra I_g e la massa presenta una resistenza verso terra R_T , la **tensione totale verso terra** vale, per la legge di Ohm, $V_T = R_T \cdot I_g$. Questo spiega perché le norme prescrivono un valore massimo per la resistenza verso terra: a parità di corrente di guasto, quanto più è alta la resistenza verso terra tanto più la tensione totale di terra assume valori pericolosi.

TENSIONE DI CONTATTO E DI PASSO

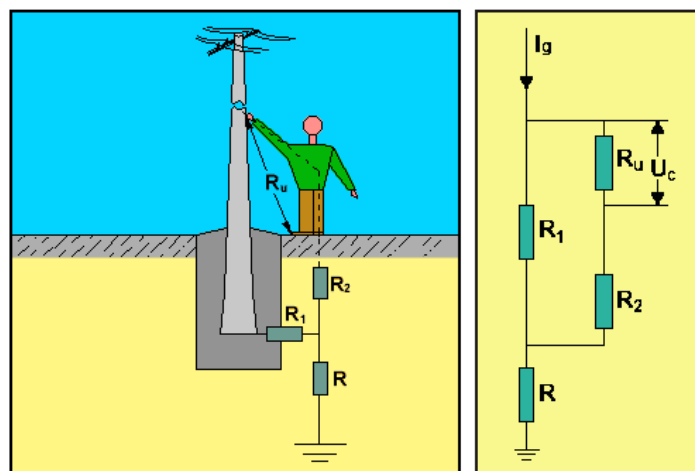
Le **tensioni di passo** e di **contatto** sono due grandezze fondamentali per la sicurezza. Si riferiscono infatti ai rischi di fenomeni di *elettrocuzione* e rappresentano le tensioni alle quali possono essere accidentalmente sottoposti gli esseri umani.

TENSIONE DI CONTATTO

La tensione di contatto è la differenza di potenziale alla quale può essere soggetto il corpo umano in contatto con parti simultaneamente accessibili, escluse le parti attive, durante il cedimento dell'isolamento.

Con il termine "parti simultaneamente accessibili" si intendono le parti esterne dell'apparecchio elettrico che l'utente può toccare. Con il termine "parti attive" si intende parti dell'apparecchio elettrico che durante il funzionamento ordinario sono in tensione. Tra la parte attiva e le parti simultaneamente accessibili dell'apparecchio elettrico è interposto l'isolamento, che ha il compito di separare elettricamente le due parti.

Rappresentiamo il circuito equivalente rappresentativo della condizione di guasto:



Dove: R_u : resistenza del corpo umano nel percorso mano-piede

R_2 : resistenza rappresentativa della resistenza di contatto tra la persona e la terra

R_1 : resistenza che si ha tra il collegamento tra l'apparecchiatura elettrica e la terra

R : resistenza rappresentativa della terra

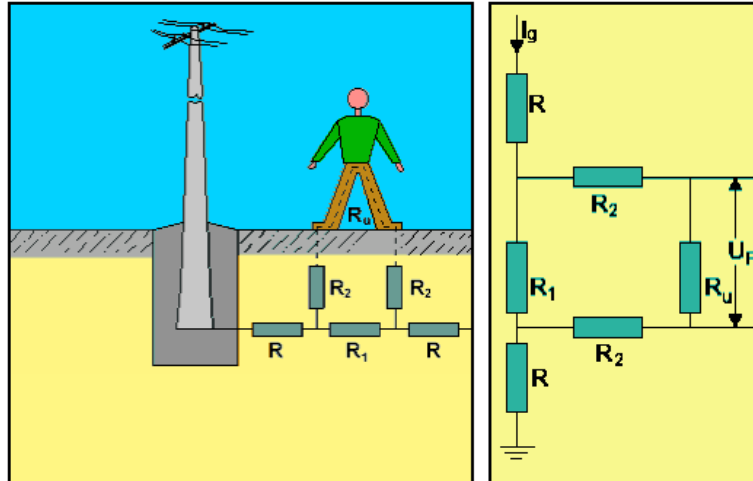
Il circuito equivalente consente di risalire con facilità alla tensione di contatto U_C . Ricordando che la corrente che attraversa il corpo umano è una piccola frazione della corrente di guasto I_g con sufficiente approssimazione si ottiene:

$$U_C = \frac{R_U}{R_U + R_2} \cdot R_1 \cdot I_g$$

TENSIONE DI PASSO

La tensione di passo è la differenza di potenziale che può risultare applicata tra i piedi di una persona alla distanza di un passo (convenzionalmente un metro) durante il cedimento dell'isolamento.

Rappresentiamo il circuito equivalente rappresentativo della condizione di guasto:



Dove: R_u : resistenza del corpo umano nel percorso piede-piede
 R_2 : resistenza rappresentativa della resistenza di contatto tra la persona e la terra
 R_1 : resistenza del terreno tra i due piedi della persona
 R : resistenza rappresentativa della terra

Con riferimento allo schema equivalente si può calcolare la U_P con la formula:

$$U_P = \frac{R_U}{R_U + R_1 + R_2} \cdot R_1 \cdot I_g$$

Dagli schemi equivalenti si può rilevare l'importanza che può assumere il valore delle resistenze R_2 (legate alla resistenza dello strato superficiale del terreno) che potrebbe essere, per ottenere un resistività più alta, realizzato con materiali appositi (ghiaia, bitume, ardesia, ecc..).

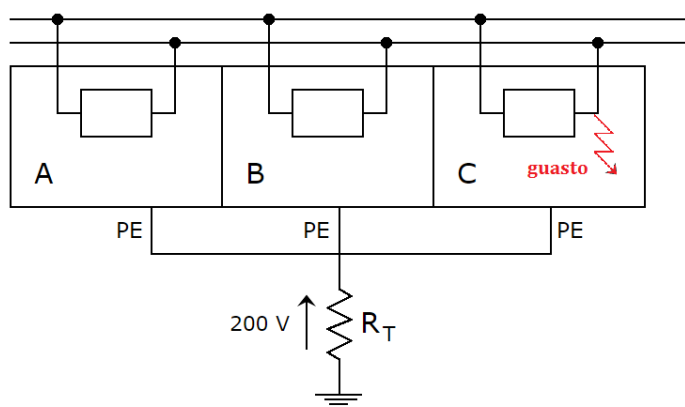
In generale la tensione di passo è molto minore della tensione di contatto $U_P < U_C$.

LE MASSE ESTRANEE

Le prove di continuità servono per verificare che tutte le masse e le **masse estranee** siano collegate all'impianto di terra. Per capire meglio la differenza tra massa e massa estranea partiamo dall'esempio di una lampada metallica installata su una trave anch'essa metallica. Ci sono due possibilità:

1. la carcassa della lampada, che è massa, è in *collegamento elettrico* con la trave, in questo caso anche la trave dovrà essere collegata a terra.
2. la carcassa della lampada è *isolata* dalla trave, nel caso la carcassa metallica della lampada vada in tensione per difetto di isolamento, la trave, che è isolata dalla lampada, non va in tensione, quindi è inutile collegarla a terra, anzi potrebbe essere pericoloso perché, realizzando tale collegamento, mandiamo in tensione, e quindi rendiamo pericolosa, una parte che rimarrebbe a potenziale zero, anche in caso di guasto.

La massa estranea è definita come “parte conduttrice non facente parte dell’impianto elettrico in grado di introdurre un potenziale, generalmente il potenziale di terra”. Ma che pericolo può creare un potenziale di zero volt? Immaginiamo un appartamento con tre stanze, dotato di impianto di terra. Si verifica un guasto verso terra in una delle tre stanze dell’impianto all’interno dell’appartamento. Prima che intervengano le protezioni differenziali, tutto l’impianto di terra dell’appartamento si eleva di tensione (200 V nell’esempio in figura, dipende dalla resistenza di terra). Essendo tutte le masse collegate fra loro dai conduttori di protezione dell’impianto di terra, se un punto qualsiasi dell’impianto “va in tensione” anche tutte le masse ad esso collegato vanno in tensione. Ma una persona che tocchi contemporaneamente due *masse*, ad esempio una lampada e il frigorifero, non è sottoposto a nessuna tensione, sia la lampada che il frigorifero sono a 200 V, e la persona si trova nelle stesse condizioni degli uccellini posati sui fili dell’alta tensione: sono in tensione, ma non sono sottoposti a nessuna differenza di potenziale, quindi non circola corrente.



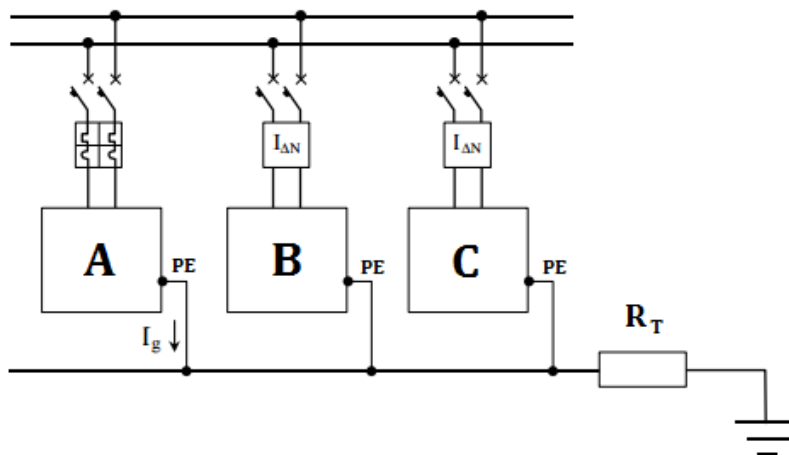
Immaginiamo ora che il malcapitato, durante il guasto tocchi contemporaneamente, non due masse, ma il frigorifero (che è andato in tensione) e il rubinetto dell’acqua che è a tensione zero. Tale tubo metallico non è collegato all’impianto di terra e arriva da molto lontano, da un punto che non è influenzato dal guasto, pertanto rimane a potenziale zero costituendo una *massa estranea*. Per il tempo di intervento delle protezioni la persona è sottoposta ad una d.d.p. di circa 230 V. Se però colleghiamo a terra anche il tubo dell’acqua tutto questo non succede in quanto anche il tubo si eleva di tensione. Chiaramente per poter essere a “potenziale zero”, la massa estranea deve provenire da fuori dell’impianto di terra. Se è interna all’impianto, quindi in pratica collegata all’impianto stesso, in caso di guasto si eleverà di tensione, quindi non potrà creare pericoli, e pertanto non rientra nella definizione di massa estranea.

ESEMPI DI MASSE ESTRANEE

Le masse estranee più comuni sono quindi le tubazioni, acquedotto e gasdotto che arrivano dall’esterno del fabbricato. È sufficiente collegarle a valle del contatore per risolvere anche i problemi delle masse estranee. Anche le tubazioni di riscaldamento centralizzato possono essere masse estranee, soprattutto se l’impianto di riscaldamento è comune a più edifici.

UN CASO PERICOLOSO

Nel caso di un impianto di terra comune a più utenze (per esempio tre appartamenti), va segnalato per una pericolosità potenzialmente elevata il caso in cui anche una sola delle utenze non sia dotata di relè differenziale. Facendo riferimento, infatti, alla figura sotto, si supponga che tutti i carichi siano provvisti di relè differenziale con la usuale alta sensibilità nominale $I_{\Delta N} = 30 \text{ mA}$, con la sola eccezione del carico A, protetto soltanto da un interruttore automatico magnetotermico.



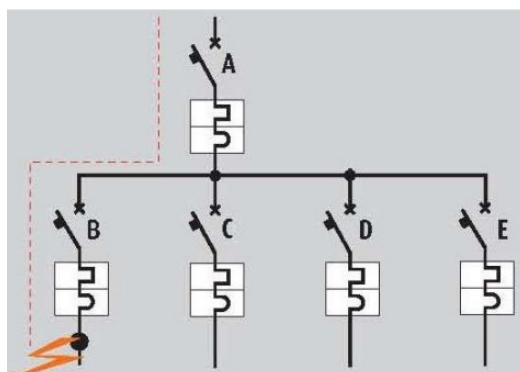
Le norme di sicurezza vengono soddisfatte con una resistenza di terra $R_T \leq \frac{50}{I_{\Delta N}} \approx \frac{5}{3} \text{ k}\Omega$. A seconda del valore che ha la resistenza di terra, quindi, avremo che in caso di guasto si genera una determinata tensione (mettiamo 200 V) che arriva anche ai carichi di B e C essendo essi collegati all'impianto di terra. Tuttavia questa tensione di guasto non viene segnalata dagli interruttori differenziali di B e C perché non rilevano alcun guasto a terra.

LA SELETTIVITÀ

Quando più dispositivi di protezione (interruttori per esempio) sono posti in serie, le loro caratteristiche di funzionamento devono essere scelte in modo da staccare dall'alimentazione solo la parte dell'impianto in cui si trova il guasto.

Si dovrà fare in modo, cioè, che alla presenza di un guasto intervenga unicamente il dispositivo di protezione installato immediatamente a monte del punto guasto. Gli altri dispositivi attraversati dalla corrente di guasto dovranno rimanere chiusi e consentire al resto dell'impianto sano di rimanere alimentato.

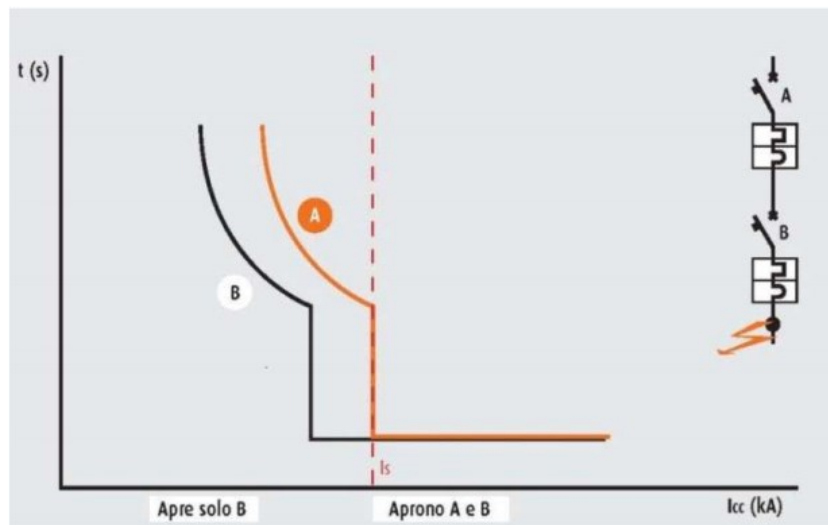
La selettività tra due interruttori in cascata (figura sotto), può essere **totale** nel caso in cui l'interruttore a valle (B) intervenga per tutti i valori di sovracorrente fino al limite del proprio potere d'interruzione, **parziale** nel caso in cui, superati certi valori di corrente, si ha l'intervento di entrambi gli interruttori (A e B). In questo caso si definisce il **limite di selettività** (I_s) che rappresenta il valore di corrente al di sotto del quale interverrà solo l'interruttore a valle e sopra del quale si avrà l'intervento di entrambi gli interruttori. La selettività può essere verificata confrontando tra loro le diverse curve caratteristiche d'intervento ed energia fornite dalle case costruttrici degli interruttori.



In pratica la protezione selettiva fra due interruttori A e B, disposti in serie in una distribuzione radiale (figura sopra), si realizza quando per un guasto nella condotta a valle (per esempio la B) interviene solo l'interruttore B immediatamente a monte del punto di guasto, mentre l'interruttore A (seppur interessato dalla corrente di guasto) non interviene, consentendo così il regolare funzionamento della condotta a monte A e di conseguenza di tutte le altre condutture a valle non interessate dal guasto (come per esempio la C, la D e la E).

SELETTIVITÀ AMPEROMETRICA

Esiste una selettività fisiologica, detta **selettività amperometrica**, per effetto dello spostamento delle caratteristiche d'intervento dei due interruttori dovuto ai diversi valori delle correnti nominali (superiore per quello a monte, inferiore per quello a valle).



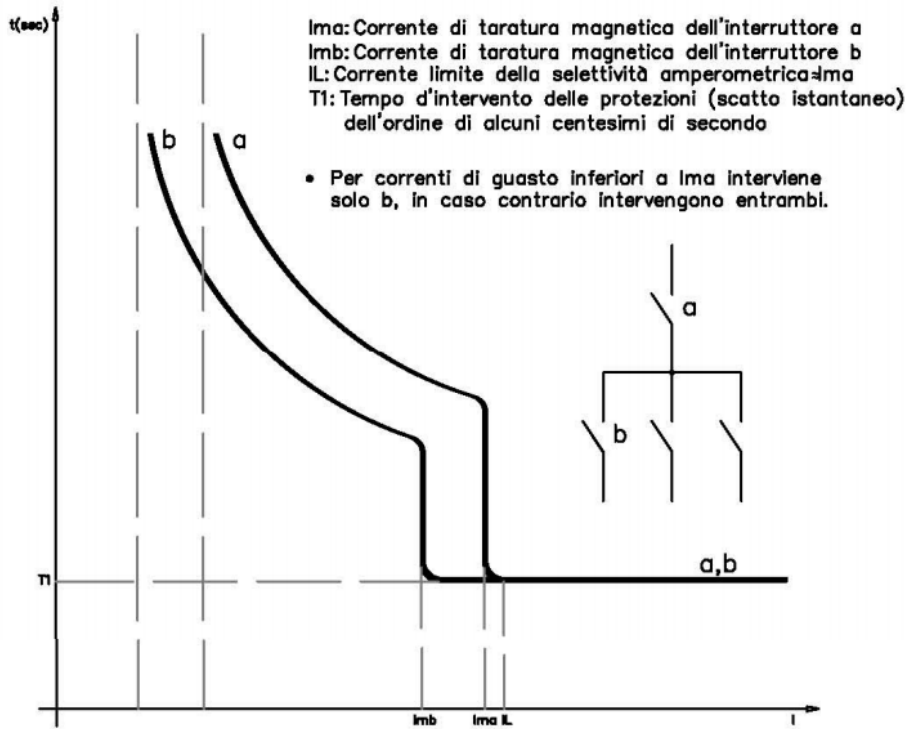
Per far sì che gli interruttori siano coordinati in maniera selettiva, occorre confrontare le curve d'intervento caratteristiche degli interruttori stessi. La selettività, graficamente, si ha quando la curva dell'interruttore a monte (A), è a destra della curva dell'interruttore a valle (B). Il punto di intersezione delle due parti magnetiche delle caratteristiche è il "limite di selettività" (I_s). Per valori inferiori ad I_s si ha solo l'intervento dell'interruttore a valle (B), al di sopra di I_s interverranno entrambi gli interruttori.

SELETTIVITÀ CRONOMETRICA

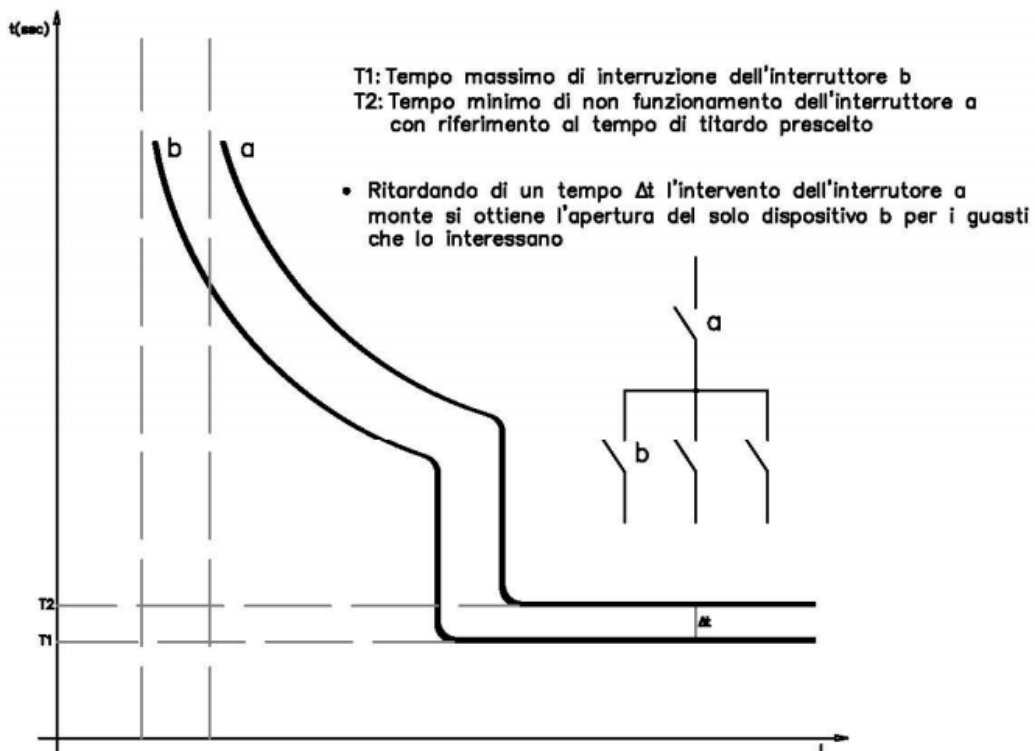
Si realizza assegnando allo sganciatore magnetico dell'interruttore a monte A un tempo d'intervento *maggiore* di quello dell'interruttore a valle B (figura sotto). In questo caso la protezione selettiva è totale: qualunque sia il valore della corrente di guasto nella condotta a valle interviene solo l'interruttore B. Occorre però che l'interruttore A sia in grado di sopportare la corrente di corto circuito massima che lo può interessare per la durata corrispondente al ritardo assegnato.

RIEPILOGO

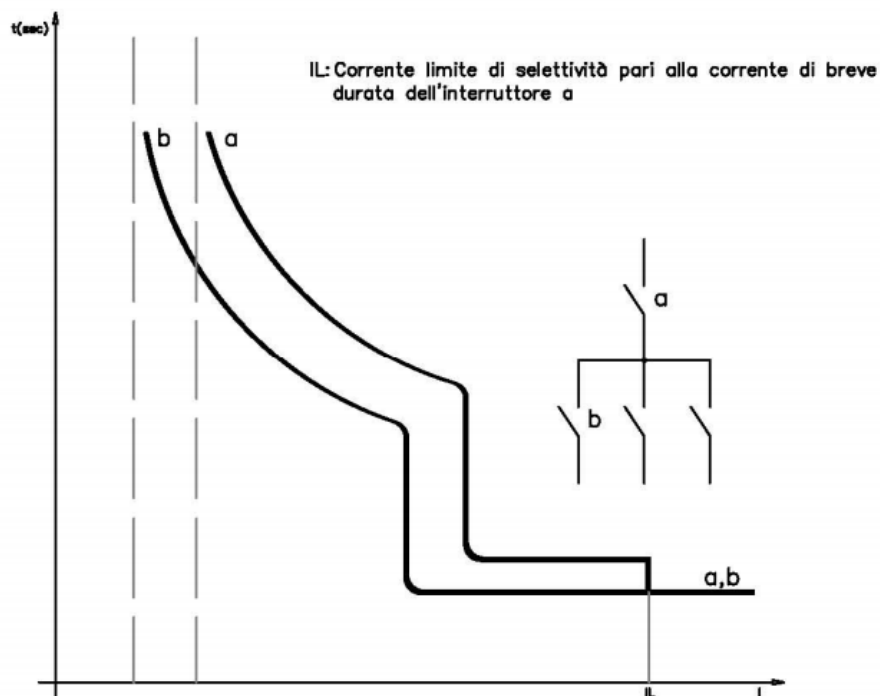
SELETTIVITÀ AMPEROMETRICA



SELETTIVITÀ CRONOMETRICA TOTALE

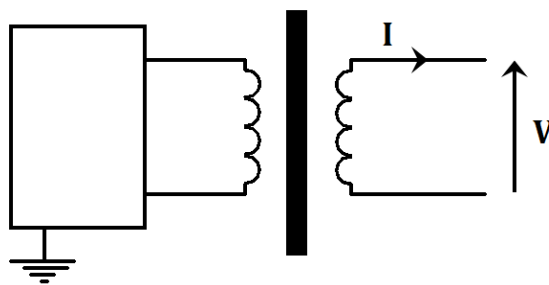


SELETTIVITÀ CRONOMETRICA PARZIALE



TRASFORMATORE DI ISOLAMENTO

Permette il passaggio da un sistema TT a uno IT in quei casi in cui necessitiamo di avere continuità di servizio anche dopo il primo guasto a terra (per esempio nelle sale operatorie).

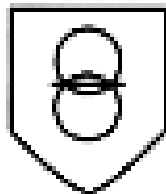


Gli avvolgimenti primari e secondari sono separati elettricamente da un **isolamento doppio** o **rinforzato** per limitare, nel circuito alimentato dall'avvolgimento secondario, rischi dovuti a contatti accidentali con la terra e con parti attive o masse che possono andare in tensione in caso di guasto all'isolamento fondamentale. Per indicare questo tipo di trasformatore si usa il simbolo:



TRASFORMATORE DI SICUREZZA

Si tratta di un trasformatore di isolamento destinato ad alimentare circuiti a bassissima tensione di sicurezza (≤ 50 Volt). Il contatto accidentale sulle fasi dell'avvolgimento secondario può essere sopportato senza alcun pericolo per l'uomo. In funzione della protezione contro i contatti diretti e indiretti viene definita la classe di isolamento di un trasformatore. Il simbolo che si usa è il seguente:

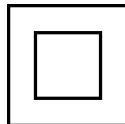


PROTEZIONI DI CLASSE II

Gli apparecchi di **classe II**, detti anche a **doppio isolamento**, sono progettati in modo da non richiedere (e pertanto non necessitano avere) la connessione delle masse a terra. Qualora fosse realizzata la messa a terra l'apparecchio viene declassato alla classe I (tre spinotti anziché due).

Sono costruiti in modo che un singolo guasto non possa causare il contatto con tensioni pericolose da parte dell'utilizzatore. Ciò è ottenuto in genere realizzando l'involucro del contenitore in materiali isolanti, o comunque facendo in modo che le parti in tensione siano circondate da un doppio strato di materiale isolante (isolamento principale + isolamento supplementare).

In Europa gli apparecchi di questa categoria devono essere marcati "*Class II*" o con il simbolo di doppio isolamento:



Esempi di questa classe sono il televisore, l'asciugacapelli, le radio, videoregistratori e DVD, la maggior parte delle lampade da tavolo (cioè tutti quei dispositivi muniti di due morsetti per la presa).

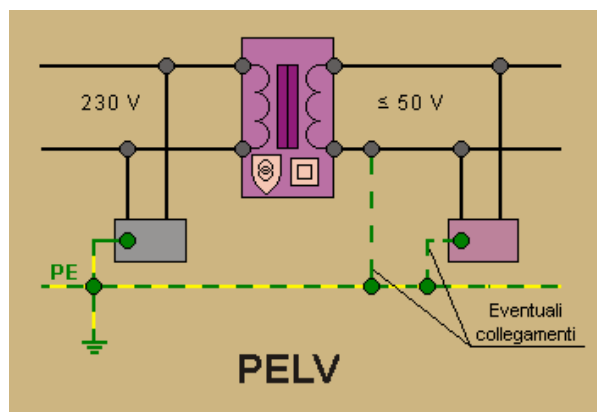
SISTEMI ELV

Esistono poi sistemi che funzionano a **bassissime tensioni** detti **ELV** (Extremely Low Voltage) che hanno meno di 50 V in alternata e meno di 120 V in correnti continue. Davanti alla sigla ELV possiamo trovare un'altra lettera a seconda del tipo di sistema che adottiamo:

- PELV
- SELV
- FELV

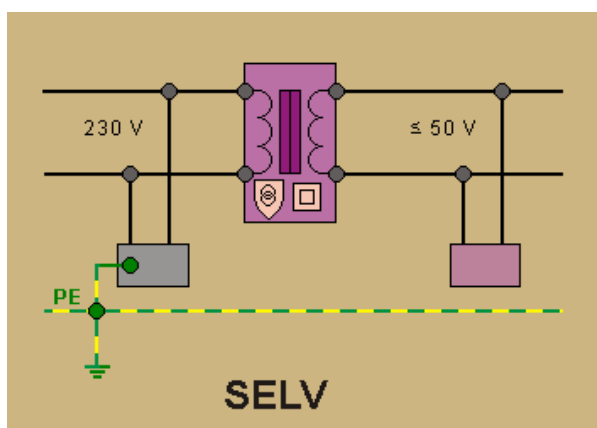
PELV (Protection Extremely Low Voltage)

Il sistema ha un punto collegato a terra:



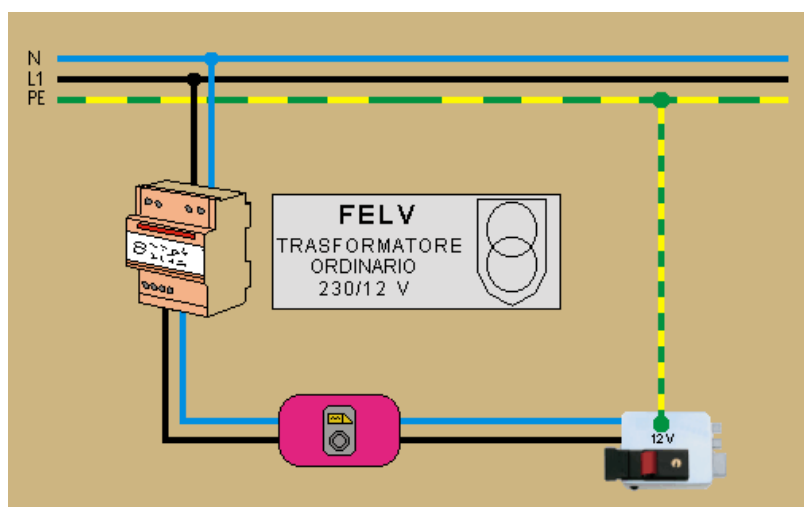
SELV (Safety Extremely Low Voltage)

Il sistema elettrico è isolato da terra:



FELV (Functional Extremely Low Voltage)

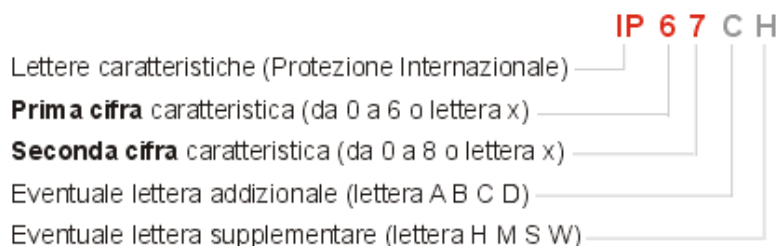
Il circuito è alimentato da un normale trasformatore, oppure i circuiti non sono separati dagli altri circuiti, e la norma CEI richiede di collegare a terra le masse di tali circuiti (la norma richiede anche che le prese FELV siano dotate di un contatto di terra):



Una saldatrice è un tipico esempio di sistema FELV perché sfrutta una tensione bassissima per generare una forte intensità di corrente.

GRADI DI PROTEZIONE IP

La normativa CEI classifica i **gradi di protezione** degli involucri per apparecchiature elettriche in base al cosiddetto **grado IP**, indicato con due cifre caratteristiche più eventuali due lettere aggiuntive:



La **prima cifra** indica il grado di protezione contro la **penetrazione di corpi solidi estranei**:

| | |
|----------|---|
| 0 | nessuna protezione |
| 1 | protetto contro corpi solidi superiori a 50 mm di diametro |
| 2 | protetto contro corpi solidi superiori a 12 mm di diametro |
| 3 | protetto contro corpi solidi superiori a 2,5 mm di diametro |
| 4 | protetto contro corpi solidi superiori a 1 mm di diametro |
| 5 | protetto contro le polveri (nessun deposito nocivo) |
| 6 | totalmente protetto contro le polveri |

La **seconda cifra** indica il grado di protezione contro la **penetrazione di liquidi**:

| | |
|----------|---|
| 0 | nessuna protezione |
| 1 | protetto contro le cadute verticali di gocce d'acqua |
| 2 | protetto contro le cadute di gocce d'acqua o pioggia fino a 15° dalla verticale |
| 3 | protetto contro le cadute di gocce d'acqua o pioggia fino a 60° dalla verticale |
| 4 | protetto contro gli spruzzi d'acqua da tutte le direzioni |
| 5 | protetto contro i getti d'acqua |
| 6 | protetto contro i getti d'acqua potenti |
| 7 | protetto contro gli effetti delle immersioni temporanee |
| 8 | protetto contro gli effetti delle immersioni continue |

La **lettera aggiuntiva** indica il grado di protezione contro l'**accesso a parti pericolose**:

| | |
|----------|--|
| A | protetto contro l'accesso con la mano |
| B | protetto contro l'accesso il dito |
| C | protetto contro l'accesso con attrezzo |
| D | protetto contro l'accesso con filo |

La **lettera supplementare** fornisce informazioni relative alla **protezione del materiale**:

| | |
|----------|---|
| H | adatto per apparecchiatura ad alta tensione |
| M | provato contro gli effetti dannosi dovuti all'ingresso d'acqua quando le parti mobili dell'apparecchiatura sono in moto |
| S | provato contro gli effetti dannosi dovuti all'ingresso d'acqua quando le parti mobili dell'apparecchiatura non sono in moto |
| W | adatto all'uso in condizioni atmosferiche specificate e dotato di misure o procedimenti addizionali |

